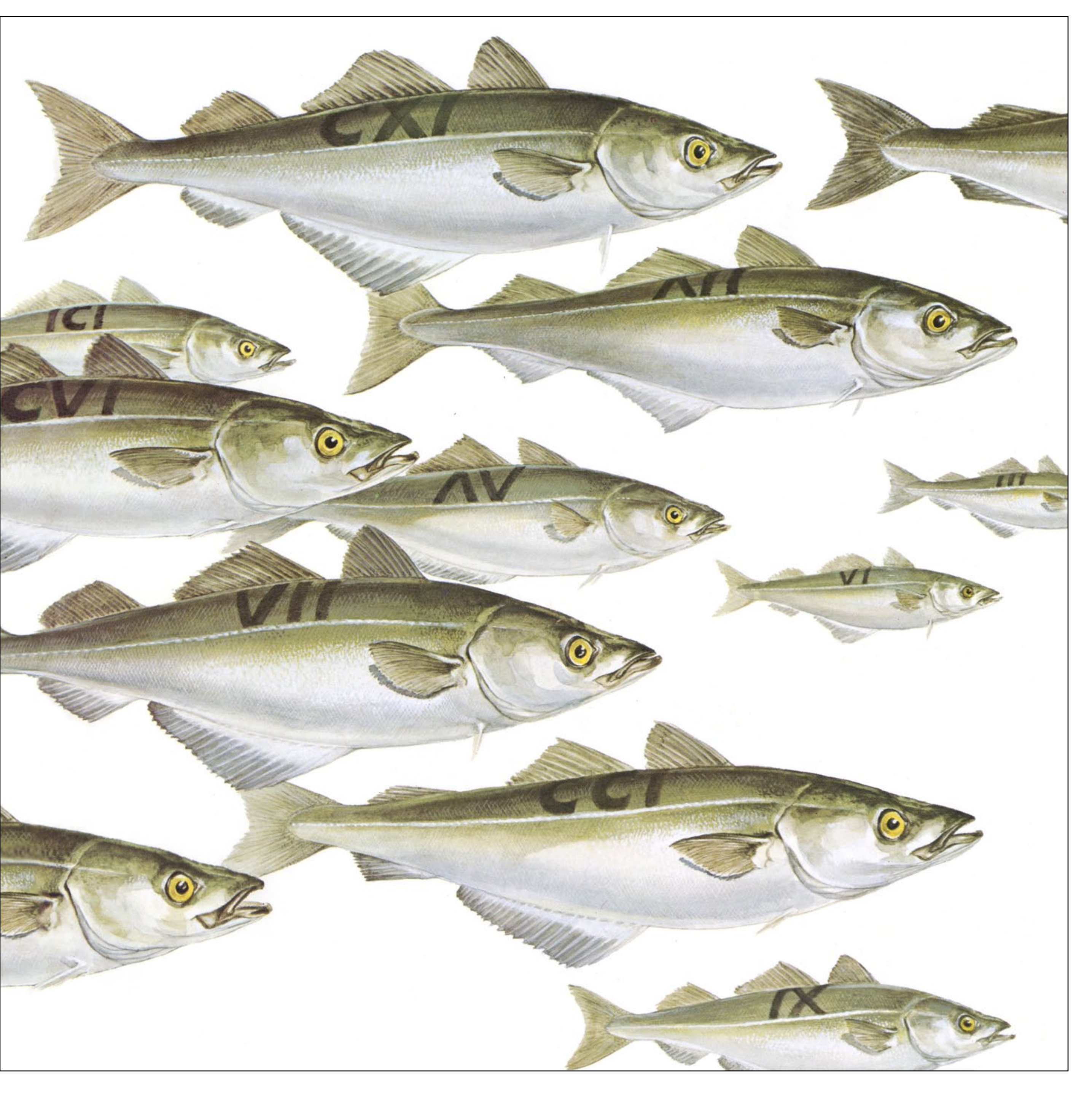
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



CARDUMENES DE PECES

Agosto 1982

300 PTAS.

Número 71
Agosto 1982

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Radioastronomía por interferometría de muy larga base;* Quira Cadenas y Eduardo Cadenas: *Calmodulina;* Amando García Rodríguez: *La mecánica cuántica de los materiales;* Antonio Blanco Freijeiro: *Arqueología de la Cueva de Lascaux;* Joandomènec Ros: *Estructura y función de los cardúmenes de peces;* Cristóbal Mezquita: *Mecanismos cerebrales de la atención cerebral;* Víctor Navarro Brotons: *La Sociedad Lunar de Birmingham;* Luis Bou: *Temas metamágicos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Eugenio Villar y Ramón Margalef

Libros:

Ignacio Morgado Bernal, Sebastián Xambó, Jordi Isern y Daniel Quesada



LA PORTADA

La portada ilustra un banco de abadejos negros (*Pollachius virens*), un pez marino que se parece mucho al bacalao y que alcanza unos 35 centímetros de longitud. Se utilizaron cardúmenes de abadejos negros en experimentos que han proporcionado la información más extensa obtenida hasta hoy sobre la estructura de esas agrupaciones de peces (véase "Estructura y función de los cardúmenes de peces", por Brian L. Partridge). El número sobre cada abadejo es una marca temporal realizada aplicando una pieza de metal frío al costado del pez. Ayudaban a identificar a los distintos individuos en bancos de 20 a 30 ejemplares que nadaban alrededor de la circunferencia de un gran depósito circular. El cardumen se seguía alrededor del depósito por un puente transversal que sostenía a un observador y una cámara de vídeo. El observador registraba en un magnetófono sus comentarios sobre la posición de los peces. El análisis de la cinta de vídeo, con la ayuda del comentario, proporcionó abundante infomación acerca de los minúsculos cambios de velocidad y dirección de los integrantes del banco.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.°, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado
por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Enid Kotschnig

Página	Fuente
6	J. L. Amorós y J. M. García-Ruiz
8-11	M. Alonso, J. L. Amorós y J. M. García-Ruiz
12-15	J. L. Amorós y J. M. García-Ruiz
16	Observatorio Palomar (*arriba*) Richard S. Simon (*abajo*)
18-21	Allen Beechel
22	Alan T. Moffet
23	Observatorio Palomar (*arriba*) Kevin J. Hussey (*abajo*)
24	Observatorio Nacional de Kitt Peak
25	Kevin J. Hussey (*izquierda*), Allen Beechel (*derecha*)
26	National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey (*arriba*), Kevin J. Hussey (*abajo*)
29-33	Alan D. Iselin
34	John R. Dedman, B. R. Brinkley y Anthony R. Means
35	Jeffrey F. Harper y Alton L. Steiner (*arriba, izquierda, y abajo*), John G. Wood (*arriba, derecha*)
36	Alan D. Iselin
38	M. Alonso y E. Villar
39-40	Gerardo García
41	E. Domínguez y Centro de Investigación y Museo de Altamira
45-48	Jerome Kuhl
61	J. Oster, Musée de l'Homme
64	Denis Vialou.
65	Andrew Tomko (*arriba*); Pamela B. Vandiver, Instituto de Tecnología de Massachusetts (*abajo*)
66	Andrew Tomko
67	Patricia J. Wynne
68	Brigitte y Gilles Delluc (*arriba*); Arlette Leroi-Gourhan, (*abajo*)
69	André Glory
70	Patricia J. Wynne
73	Robert Holland, Universidad de Miami
74	Brian L. Partridge
75	Tom Prentiss
76	National Marine Fisheries Services (*arriba*); James A. Bohnsack, (*abajo*)
77-81	Tom Prentiss
85	Caroline F. Keating, Colgate University, y Gregory Keating, Hospital Clínico Upstate en Syracuse, Universidad estatal de Nueva York
86-91	Patricia J. Wynne
92	Richard Jung, Universidad de Freiburg
95	The Granger Collection
96	The Birmingham Assay Office
97-100	Cortesía de la National Portrait Gallery, Londres
102	Departamento de Bibliotecas Públicas de Birmingham
111-117	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOSE LUIS AMOROS y JUAN MANUEL GARCIA-RUIZ ("Agregados cristalinos de morfología inducida") pertencen al claustro de la Facultad de Geología de la Universidad Complutense de Madrid. Amorós es catedrático y director del departamento de cristalografía, mineralogía y mineralotecnia. En su extensa producción científica se distinguen tres períodos: de 1945 a 1954, en que trabaja, primero en la Universidad de Barcelona y luego en la Complutense de Madrid, en polimorfismo y agitación térmica de cristales; de 1955 a 1965, en que como director del Centro de Materiales de la Southern Illinois University se centra sobre los problemas de dilatación térmica, estructura de las cubiertas electrónicas de átomos en cristales e historia de la cristalografía, y de 1965 hasta nuestros días en la Universidad Complutense de Madrid en que ha insistido en problemas de crecimiento cristalino. García-Ruiz se doctoró en 1980 por la Universidad Complutense de Madrid. Trabaja sobre la problemática del crecimiento cristalino, en especial, la técnica del gel de sílice y la biocristalización, estando asimismo interesado en la metodología de las ciencias geológicas.

ANTHONY C. S. READHEAD ("Radioastronomía por interferometría de muy larga base") es profesor de astronomía del Instituto de Tecnología de California (Cal Tech) y director del Radioobservatorio de Owens Valley. Se licenció por la Universidad sudafricana de Witwatersrand en 1968. En 1972 se doctoró por la de Cambridge. De 1972 a 1977 continuó sus trabajos mediante una ayuda a la investigación de la Royal Society de Londres, primero en Cambridge y después en el Cal Tech.

WAI YIU CHEUNG ("Calmodulina") trabaja de bioquímico en el St. Jude Children's Research Hospital de Memphis, Tennessee. Nacido en Kuantung, China, se licenció en ciencias por la Universidad Nacional Tsung Hsing de Taiwán en 1956. Amplió sus estudios en los Estados Unidos, doctorándose, en 1964, por la de Cornell. De 1964 a 1967 investigó, becado, en la Universidad de Pennsylvania. Ese último año se trasladó a St. Jude. Desde 1976 es también profesor de bioquímica del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Tennessee en Memphis. El tema de investigación en que está principalmente interesado es el de las moléculas que actúan de mensajeros entre las células en la regulación de los procesos biológicos.

MARVIN L. COHEN, VOLKER HEINE y JAMES C. PHILLIPS ("La mecánica cuántica de los materiales") son físicos expertos en la estructura de los sólidos y su relación con las propiedades de esos materiales. Cohen es profesor de física de la Universidad de California en Berkeley. Se licenció en 1957 por la Universidad de California en Berkeley. En 1958 completó el segundo ciclo universitario en la de Chicago. En 1964 se recibió de doctor por esa misma institución. Durante 1963 y 1964 trabajó en los Laboratorios Bell. Heine es profesor de física de la Universidad de Cambridge. Nacido en Alemania, emigró a Nueva Zelanda en 1939. Inició sus estudios de física en este país, que culminaría en 1953 licenciándose por la Universidad de Otago. Más tarde se desplazó a Inglaterra, donde se doctoró por la de Cambridge en 1956. Phillips trabaja actualmente en los Laboratorios Bell. Durante 1958 y 1959 realizó trabajos de investigación en la Universidad de California en Berkeley; pasó los dos años siguientes en Cambridge. De 1960 a 1968 enseñó en la Universidad de Chicago.

ARLETTE LEROI-GOURHAN ("Arqueología de la Cueva de Lascaux") dirige el laboratorio de palinología del Museo del Hombre de París. Licenciada en arqueología oriental por la École du Louvre, pasó después dos años en Japón con su marido, el antropólogo André Leroi-Gourhan. De regreso a Francia, trabajó tres años en el Museo de Historia Natural, estudiando métodos de aplicación de los conocimientos botánicos a la arqueología.

BRIAN L. PARTRIDGE ("Estructura y función de los cardúmenes de peces") es profesor adjunto de biología en la Universidad de Miami. Se formó en la Universidad de Stanford y en la de Columbia Británica, si bien obtuvo el doctorado, en 1978, por la Universidad de Oxford. Se trasladó después a la Scripps Institution of Oceanography como investigador, estudiando los mecanismos neurológicos que permiten localizar objetos a los peces débilmente eléctricos.

ROBERT H. WURTZ, MICHAEL E. GOLDBERG y DAVID LEE ROBINSON ("Mecanismos cerebrales de la atención visual") trabajan juntos en el Laboratorio de Investigación Sensorial y Motora del Instituto Nacional de Investigación Ocular. Su interés común es el estudio de la percepción visual. Wurtz es jefe del laboratorio; se licenció en 1958 por el Oberlin College y se doctoró por la Universidad de Michigan en 1962. De 1962 a 1965 fue profesor adjunto de investigación de la Universidd de Washington. Se trasladó a los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) en 1965. Goldberg es jefe de la sección de mecanismos neuro-oftalmológicos básicos en el mismo laboratorio. Se licenció en 1963 por el Harvard College y se doctoró en medicina en 1968 por la Facultad de Harvard. En 1969 se unió al grupo del NIH como neurólogo asociado del Instituto Nacional de la Salud Mental. Desde 1976 da clases de neurología clínica en la Universidad Georgetown. Robinson es fisiólogo. Se licenció, en 1965, por el Springfield College y, en 1968, completó el segundo ciclo por la Universidad Wake Forest, doctorándose en 1972 por la de Rochester. De 1971 a 1974 fue investigador en neurofisiología en el Instituto Nacional de la Salud Mental, dejando su puesto en 1974 para trabajar en el Instituto de Investigaciones Radiobiológicas de las Fuerzas Armadas.

LORD RITCHIE-CALDER ("La Sociedad Lunar de Birmingham") falleció el pasado enero, a la edad de 75 años, tras desarrollar una amplia labor como escritor de temas científicos y técnicos y de sus implicaciones sociales. Nacido en Escocia, dejó la escuela a los 15 años para trabajar como periodista del tribunal correccional, primero en Dundee y luego en Glasgow. En 1926 se trasladó a Londres donde, como colaborador de *Daily News, Daily Chronicle* y *The Daily Herald* se hizo famoso en el periodismo londinense por sus reportajes sobre la agitación social de la Depresión y por su adelantado tratamiento de la ciencia. Desde 1961 hasta 1967 ocupó una cátedra de relaciones internacionales establecida para él en la Universidad de Edimburgo. Elevado a la dignidad de par en 1966, fue presidente de la U. K. Metrication Board y consejero fundador de la Universidad a distancia.

Hace…

José M.ª López Piñero

… cuatrocientos años

Cristóbal de Rojas entró como ayudante de Juan de Herrera en las obras de construcción del Escorial. Nacido en 1555, al parecer en Toledo, estudió en su universidad, donde tuvo como profesor de matemáticas a Alonso Cedillo. Su formación como ingeniero discurrió junto a Herrera, al que mantuvo siempre una gran admiración, llamándole, ya en su madurez, "varón en las ciencias matemáticas tan excelente que no puede España preciarse de tal hijo menos que Sicilia de Arquímedes e Italia de Vitrubio".

En 1584, al terminarse las obras del Escorial, Rojas se trasladó a Sevilla y durante cuatro años trabajó en diferentes construcciones de carácter civil en dicha ciudad o en zonas cercanas a la misma. Algunas de ellas, en especial una presa en el río Guadajoz que planteaba notables dificultades, le dieron un prestigio que culminó con el nombramiento de "maestro mayor de las fábricas (= edificios) de la ciudad de Sevilla". En Sevilla conoció también a Tiburcio Spanochi, ingeniero italiano al servicio de Felipe II e importante figura en el campo de la arquitectura militar. Spanochi influyó poderosamente en la trayectoria de Rojas, siendo seguramente el responsable de que se dedicara a la fortificación.

En 1588, todavía como "maestro cantero", Rojas fue comisionado para inspeccionar las fortificaciones de Pamplona, encargo que debió a la intercesión de Spanochi. Al terminar este trabajo, solicitó el nombramiento de "ingeniero real" que se le denegó de momento, a pesar de recibir un informe favorable, en el que se afirmaba que las obras por él realizadas "han salido muy buenas… y que sabe muy bien la matemática". Este informe le valió, no obstante, el nombramiento de "maestro mayor de Cádiz", en cuyas fortificaciones trabajó hasta 1591.

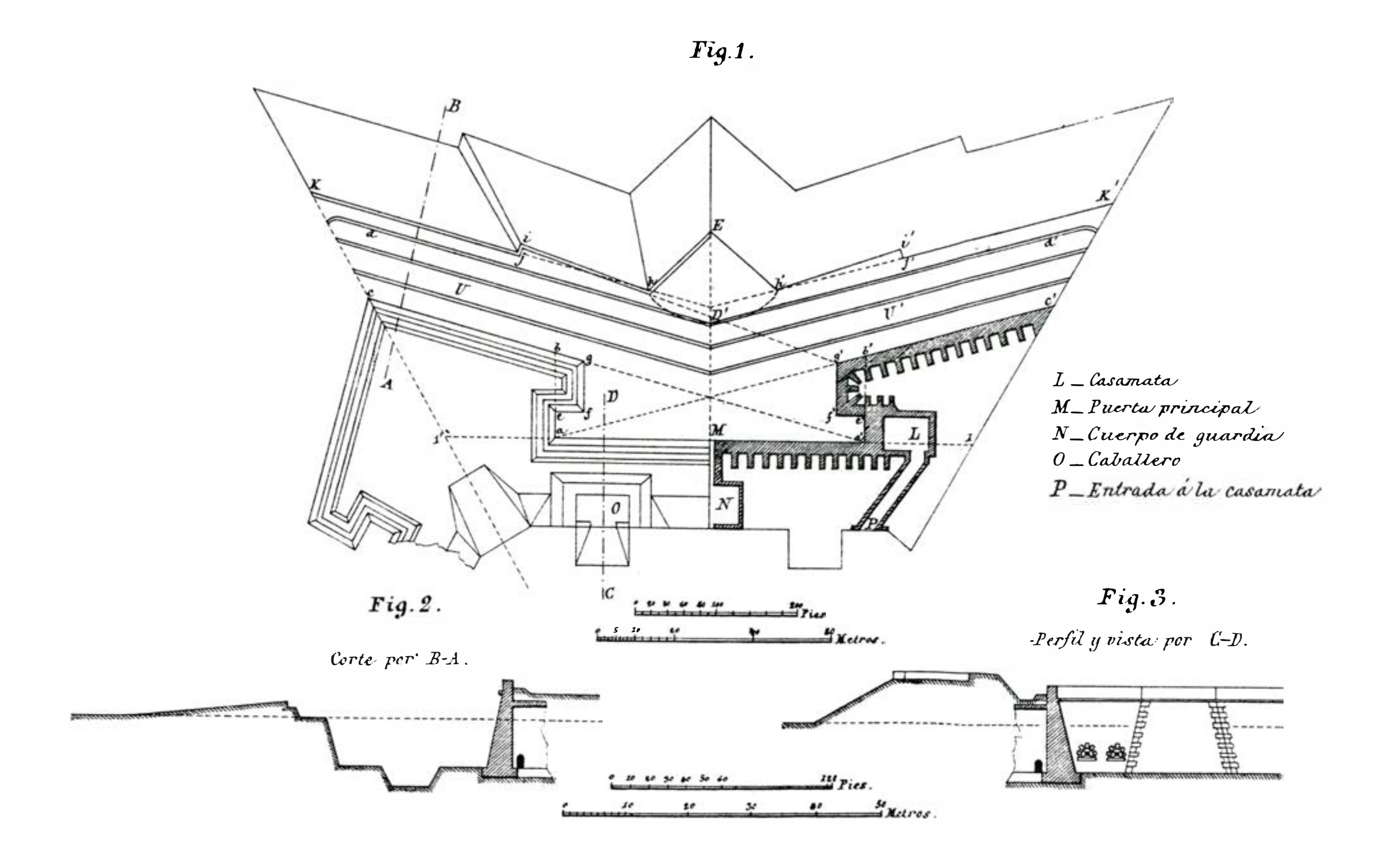
Desde 1591 hasta 1595, Rojas residió en Bretaña como técnico al servicio del ejército expedicionario español allí desplazado. Redactó entonces una memoria en la que demostró la falta de fundamento de las modificaciones que el siciliano Giulio Lasso había propuesto para el revestimiento de las escarpas. Dicha memoria fue presentada a Felipe II en marzo de 1595 e informada favorablemente por Juan de Herrera poco más tarde. En octubre del mismo año, Rojas recibió, por fin, el nombramiento de "ingeniero real". Hasta su muerte, en Cádiz el año 1614, se consagró a las tareas previstas en este nombramiento, consistentes en "asistir a todas las fábricas de las fortificaciones de castillos, torres y fortalezas que por mi mandato se han hecho y ordenare que se hagan en cualquiera parte de mis Reinos". Sus trabajos más importantes fueron fortificaciones en la costa andaluza comprendida entre Cádiz y Gibraltar, aunque estuvo también en otros territorios europeos y del norte de Africa dependientes de la corona española.

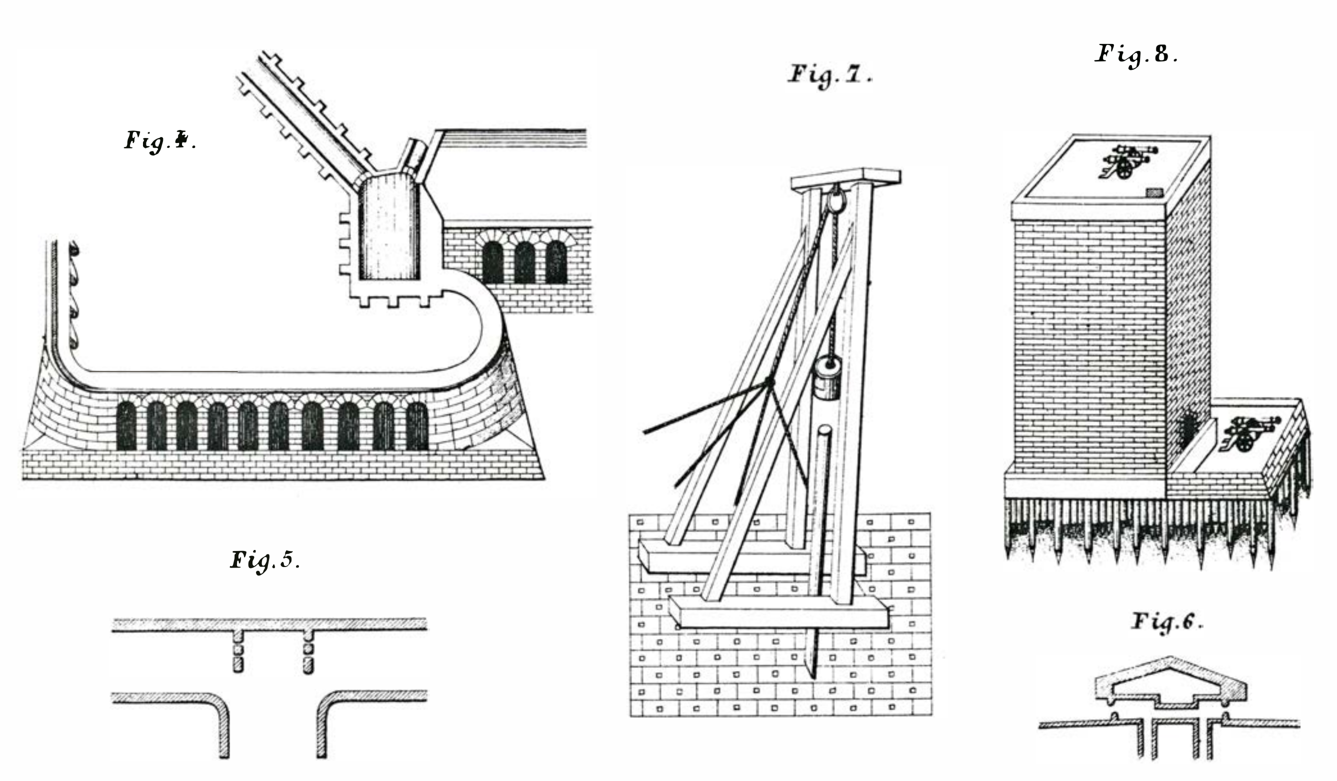
Junto a Rojas, colaborando con él como ayudante, se formaron varios ingenieros o completaron su experiencia en temas de fortificación; entre ellos sobresale Juan Cedillo Díaz, quien llegó a ser una figura tan notable como su maestro. Por otra parte, Rojas fue profesor de la Academia de Matemáticas, la importante institución técnica que Felipe II fundó en Madrid por iniciativa de Juan de Herrera. Enseñó en ella "la materia de fortificación" y tuvo como principales asistentes a sus lecciones a ingenieros y militares, algunos de tanto relieve como Bernardino de Mendoza y Tiburcio Spanochi, su antiguo protector.

El éxito de esta enseñanza fue el motivo inmediato de que Rojas redactara un tratado sistemático que, con el título de *Teoría y práctica de fortificación*, apareció impreso en 1598, después de que su autor lo sometiera a la crítica de Herrera y Spanochi. Considerado como la más importante publicación sobre el tema editada en la España del siglo XVI, comprende tres partes. La primera de ellas, tras un capítulo preliminar acerca de las condiciones que debe reunir un ingeniero para dedicarse a la fortificación, está consagrada a los fundamentos matemáticos. Comienza ocupándose de la aritmética y advierte "que todas las medidas y defensas de fortificación que están escritas de los ingenieros antiguos no nos sirven en este tiempo, conforme al arte militar presente"; a continuación y con mayor amplitud, expone la geometría. La segunda parte trata de los principios generales de fortificación, empezando por la traza, aspecto en el que Mariátegui considera que reside la importancia del libro; estudia también problemas técnicos de la construcción de fortificaciones y del modo de levantar planos y manejar instrumentos. La tercera parte se ocupa principalmente del reconocimiento y adquisición de materiales, así como de técnicas como el corte de piedras, la cimentación del terreno o la arquitectura que debe saber el ingeniero.

Rojas publicó más tarde un resumen de su obra destinado a militares sin una preparación técnica especial. Bajo el título de *Compendio y breve resolución de fortificaciones* (1613), ofreció, en ocho capítulos y poco más de cien páginas, una especie de divulgación de la materia. Otro texto suyo impreso fue un pliego, publicado en 1611, en torno al problema "de que sean vacíos los baluartes de la fortificación y no macizos". Defendió estos últimos en los siguientes términos: "De cuarenta años a esta parte tengo alguna experiencia en obras en diferentes terrenos, así en tierra como en el mar; y también tengo entera notica y alguna experiencia de fabricar con tierra y fajina [= haz de ramas muy apretadas] y céspedes, por haber hecho algunos fuertes en campaña en sitios de plazas, para quitarles el socorro. Y así, por estar enterado deste modo de fabricar, digo que los terraplenos de los baluartes vacíos no serán durables; antes estarán sujetos a que, en lloviendo dos turbiones, se desgarre toda la tierra dellos y haga arroyos en los rincones que están allí… y lo peor será que se adelgazará el terrapleno de treinta pies y se convertirá en menos de la mitad con las lluvias, y ansí, a mi parecerd, debe estar macizo cualquier baluarte para estar libre de los inconvenientes dichos".

Quedaron manuscritas varias memorias técnicas de Rojas, entre ellas la de 1595, antes citada, y otra de 1609 relativa a "la fortificación del Puntal y Matagorda de la Bahía, de la ciudad de Cádiz". Más importante es el *Sumario de la milicia antigua y moderna* (1607), libro suyo que circuló a través de copias manuscritas. Además de otros textos de menor interés, incluye unas "Reglas de la fortificación moderna", en las que amplía algunos aspectos de su obra de 1598, un "Tratado de la artillería" y una exposición monográfica sobre "un modo nuevo de fabricar dentro en la mar las torres a menos costa y la obra más firme".





*(**1-3**) Esquemas del "frente abaluartado" que, en opinión de Rojas, reunía las mejores condiciones defensivas. (**4**) Modelo de Rojas para un baluarte con las esquinas redondeadas en su mitad superior. (**5-6**) Diseños de Rojas para "baluartes reales", es decir, lo bastante fuertes para resistir disparos de la artillería gruesa o "real". (**7**) Forma de clavar estacas y disposición de hileras de piedras labradas, según la técnica de Rojas para construir una plataforma "dentro en la mar". (**8**) Modelo de Rojas para una "torre dentro en la mar", construida sobre una plataforma de diez pies de alto sobre el nivel del agua. [Todas estas figuras las dibujó Eduardo de Mariátegui (1880) de acuerdo con los diseños e indicaciones de Rojas en sus obras* **Teoría y práctica de fortificación** *(1598) y* **Sumario de la milicia antigua y moderna** *(1607).]*

Agregados cristalinos de morfología inducida

La forma y textura de las partes duras de los organismos guardan una estrecha relación con los agregados cristalinos inorgánicos desarrollados en el laboratorio

José Luis Amorós y Juan Manuel García-Ruiz

Desde que la ciencia de los cristales apareció en 1669, con la publicación en Florencia de la obra de Nicolás Stensen *De solido intra solidum naturaliter contento, dissertationis prodromus*, donde se da la primera explicación del crecimiento de los sólidos, dicho desarrollo ha constituido el tema central de la cristalografía. Pero a pesar del tiempo transcurrido, el problema anda lejos aún de hallarse resuelto en su aspecto teórico y práctico. Un capítulo interesante de ese tema general del crecimiento de los cristales es el referente a los exoesqueletos con que algunos organismos protegen, a modo de coraza, su organismo. De múltiples formas y dotadas de una evidente simetría que permiten describirlas de acuerdo con figuras geométricas bien definidas, esas segregaciones de ciertos animales (artrópodos sobre todo) presentan una innegable belleza y perfección. La labor pionera de Thomas Cook y D'Arcy Thompson, durante la primera mitad de nuestro siglo, contribuyó al conocimiento matemático de la forma orgánica y, en concreto, de sus partes duras, lo que hoy denominamos agregados cristalinos de origen orgánico, frente a los minerales inorgánicos propiamente dichos.

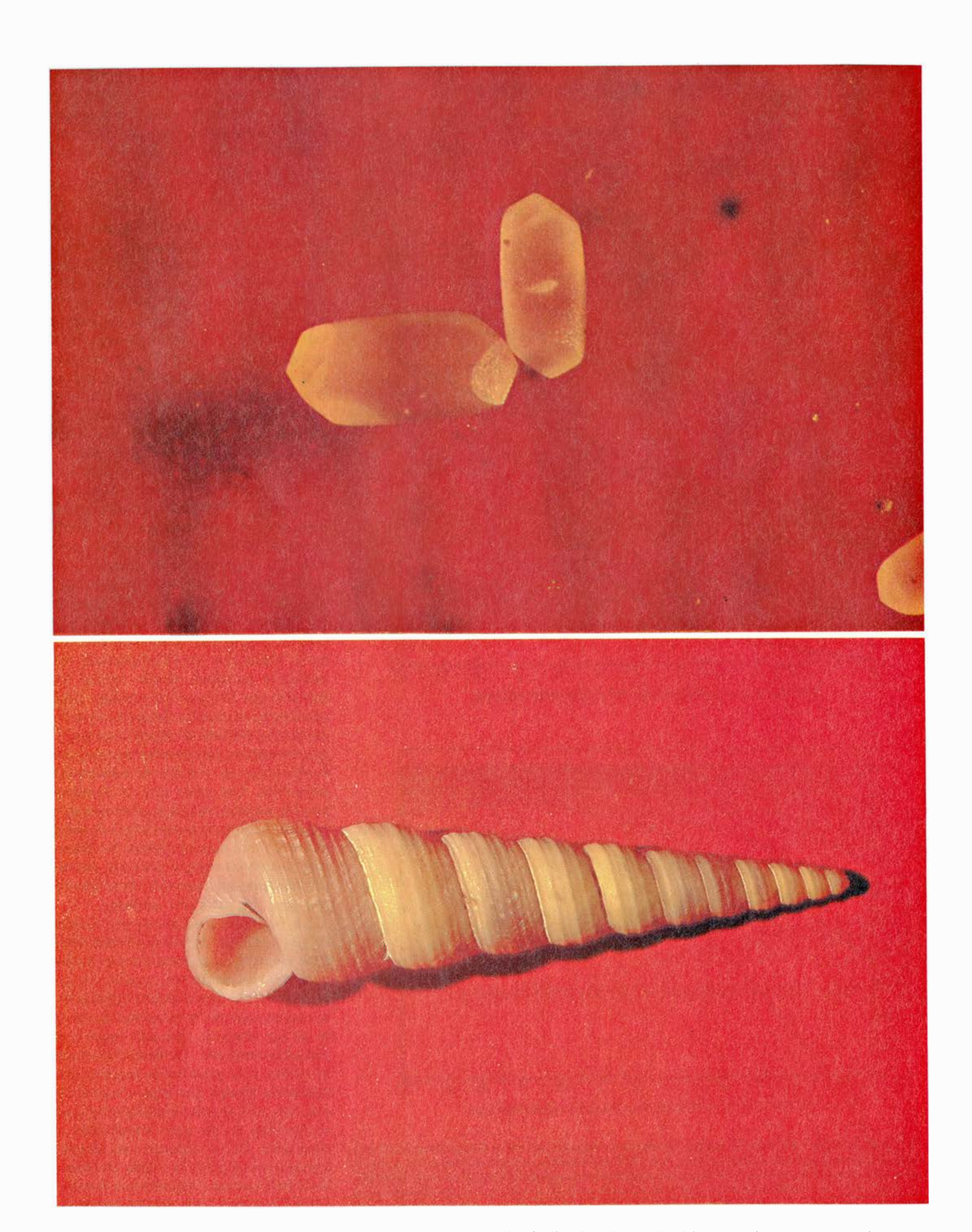
Estos agregados cristalinos están formados, en la gran mayoría de los casos, por agrupaciones de cristales de carbonato cálcico, un compuesto químico que tiene la particularidad de presentar tres variantes polimórficas cristalinas, esto es, tres posibilidades distintas de disponer sus átomos; constituirán diferentes estructuras que se van repitiendo en las tres dimensiones. Las estructuras que se repiten se llaman periódicas. La configuración más estable de todas ellas, a presión y temperatura ambiental, se denomina calcita y cristaliza en el sistema trigonal en una estructura de alta simetría. La segunda variedad, el aragonito, cristaliza en el sistema rómbico con una estructura también de gran simetría; es ligeramente inestable con respecto a la calcita, por lo que con el tiempo sus átomos pasan a adoptar la configuración de ésta. La última variante, la vaterita, que cristaliza en el sistema hexagonal con una estructura bastante desordenada, es muy inestable con respecto a las otras dos anteriormente citadas.

Esta es la razón de que en los sistemas biológicos, en todos los *phyla*, desde los protozoos hasta los cordados e incluso en ciertos grupos de algas, puedan encontrarse agrupaciones cristalinas de los dos primeros tipos de polimorfos. De hecho, la mayor parte del carbonato cálcico de origen orgánico se presenta en la forma de calcita o aragonito. Por el contrario, la presencia de vaterita sólo se ha registrado en muy pocos grupos filogenéticos.

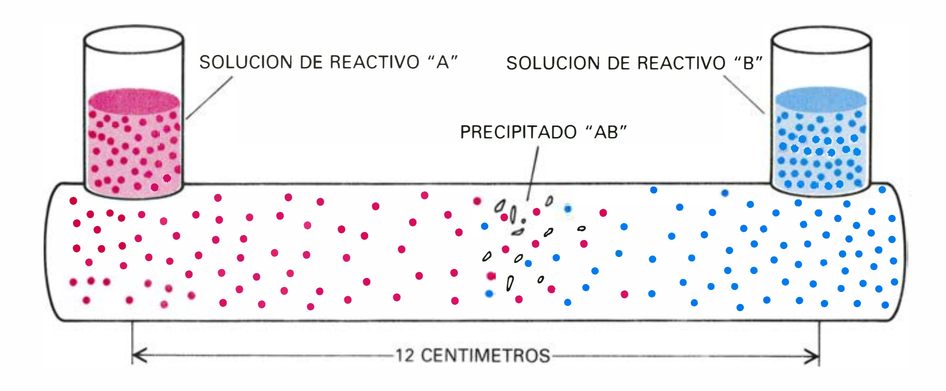
Puesto que los exoesqueletos están formados por agregados de cristales, cabría esperar que la simetría global del conjunto viniera determinada por las restricciones impuestas por la simetría propia de cada uno de los polimorfos que lo constituyen. No obstante, es fácil comprobar que no es así; hay convergencia de formas, cualquiera que sea la estructura geométrica del carbonato de calcio que constituye el agregado cristalino. Por esa razón, conviene tratar el aspecto morfológico del agregado como un todo único e indiviso.

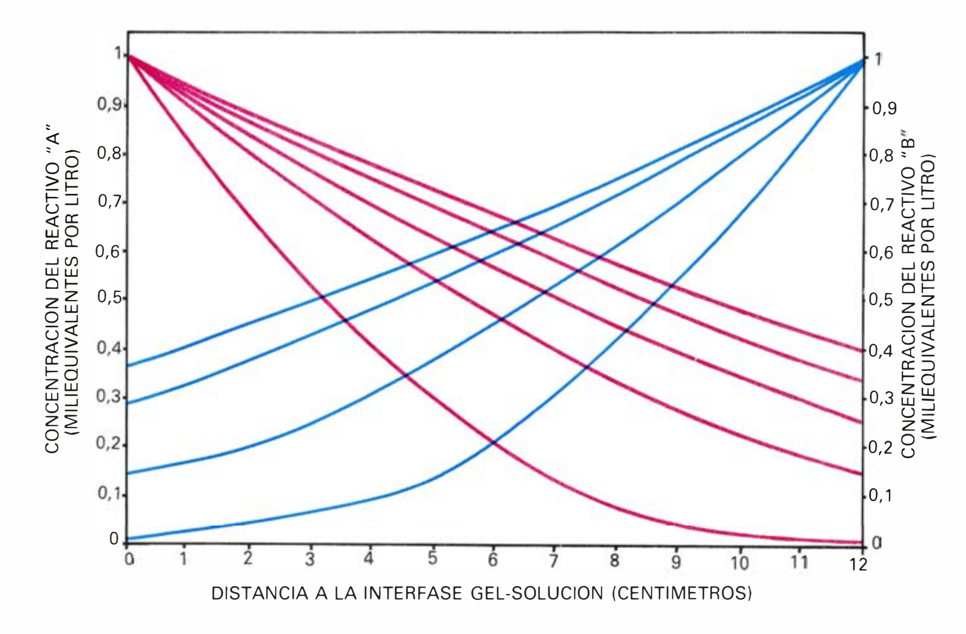
¿A qué se llama simetría? Podemos definirla como la relación métrica que existe entre el todo y cada una de sus partes o entre las distintas partes de un todo. Dicha relación puede formalizarse a través de los operadores de simetría. Se entiende por tales los operadores que realizan las transformaciones que relacionan a las figuras simétricas.

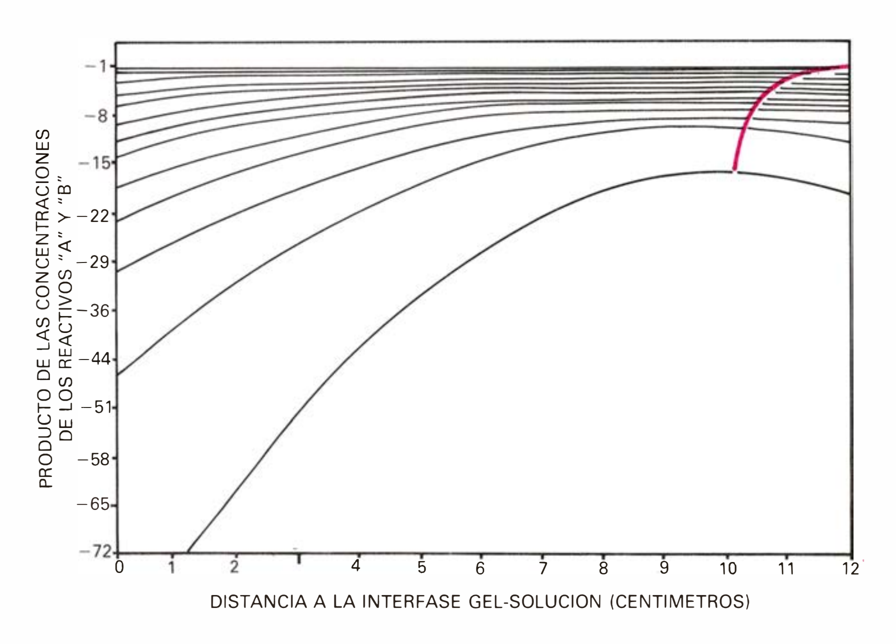
Así, los sólidos cristalinos presentan una simetría isométrica, puesto que los motivos o partes del todo se mantienen iguales y regularmente dispuestos en las tres direcciones del espacio. En este tipo de simetría, cualquier operador deja la figura invariante o, dicho de otra forma, congruente consigo misma. Así, un eje de simetría de rotación, o simplemente eje de simetría de orden *n* es una línea alrededor de la cual mediante un giro de 360 grados, un cuerpo (por ejemplo una red cristalina) es *n* veces transformado en sí misma. La necesidad de congruencia entre la red inicial y la red conseguida tras la operación de simetría introduce importantes limitaciones al número de operadores posibles. Por ejemplo, sólo son permisibles ejes de simetría del orden 1, 2, 3, 4 o 6, bien solos o asociados a traslaciones finitas. En cambio, cuando se abordan configuraciones infinitas no periódicas, las operaciones con respecto a las cuales la figura se considera invariante no son ya necesariamente congruencias, sino que pueden ser semejanzas. En este caso, los motivos, en vez de ser iguales, son semejantes entre sí y pueden dejar de estar ordenados regularmente por traslación, para estar ligados por otra ley de relación cualquiera. Se habla entonces de simetría diferencial u homeometría. Este es el caso de la simetría que presentan los agregados cristalinos de origen orgánico que forman las conchas y, en general, los exoesqueletos de organismos biológicos. En ellos es posible encontrar ejes de simetría de orden infinito independientes o asociados a traslaciones infinitamente pequeñas, operado-



CRISTALES DE CALCITA ($CaCO_3$) de caras curvas obtenidos en el laboratorio (*fotografía superior*). Su simetría, inclusive la presencia de esas caras no singulares, es compatible con una red periódica tridimensional. Abajo, un agregado cristalino biológico, la concha de un turritélido. Consta de infinidad de cristalitos de carbonato de calcio cuyo conjunto presenta una simetría, en particular el eje helicoidal de orden infinito, inexplicable por las relaciones cristal-cristal. Cuando la morfología de una agrupación depende de la presencia de un agente exterior se habla de agregados de morfología inducida.







CRECIMIENTO DE CRISTALES en geles. El dispositivo experimental consta de un tubo en *U*, en cuya parte horizontal se encuentra el gel (*arriba*). Las soluciones reactivos de concentraciones Co_A y Co_B se colocan en cada una de las ramas verticales e inmediatamente comienzan a transportarse por difusión a través del gel. La concentración de los reactivos en cada punto de la columna del gel depende de su distancia a la interfase, del tiempo, de la concentración de la solución inicial, del coeficiente de difusión de la sustancia y de la porosidad del gel. En la figura intermedia se muestra el gradiente de concentraciones teórico según un modelo realizado con Félix Miguez, en el Centro de Cálculo de la Escuela de Minas de Madrid. En el gráfico inferior aparece el valor del producto de las concentraciones de los reactivos a lo largo del gel en diferentes tiempos. En el punto *P* y el momeno *t* en que el producto de los reactivos alcance la concentración crítica del compuesto AB, de suerte que $C_A = C_B$, se producirá el precipitado.

res de extensión y, en general, elementos de simetría que son incompatibles con la propia de los sólidos cristalinos. Estos operadores son los que confieren a las morfologías que presentan dicha asimetría su atractivo.

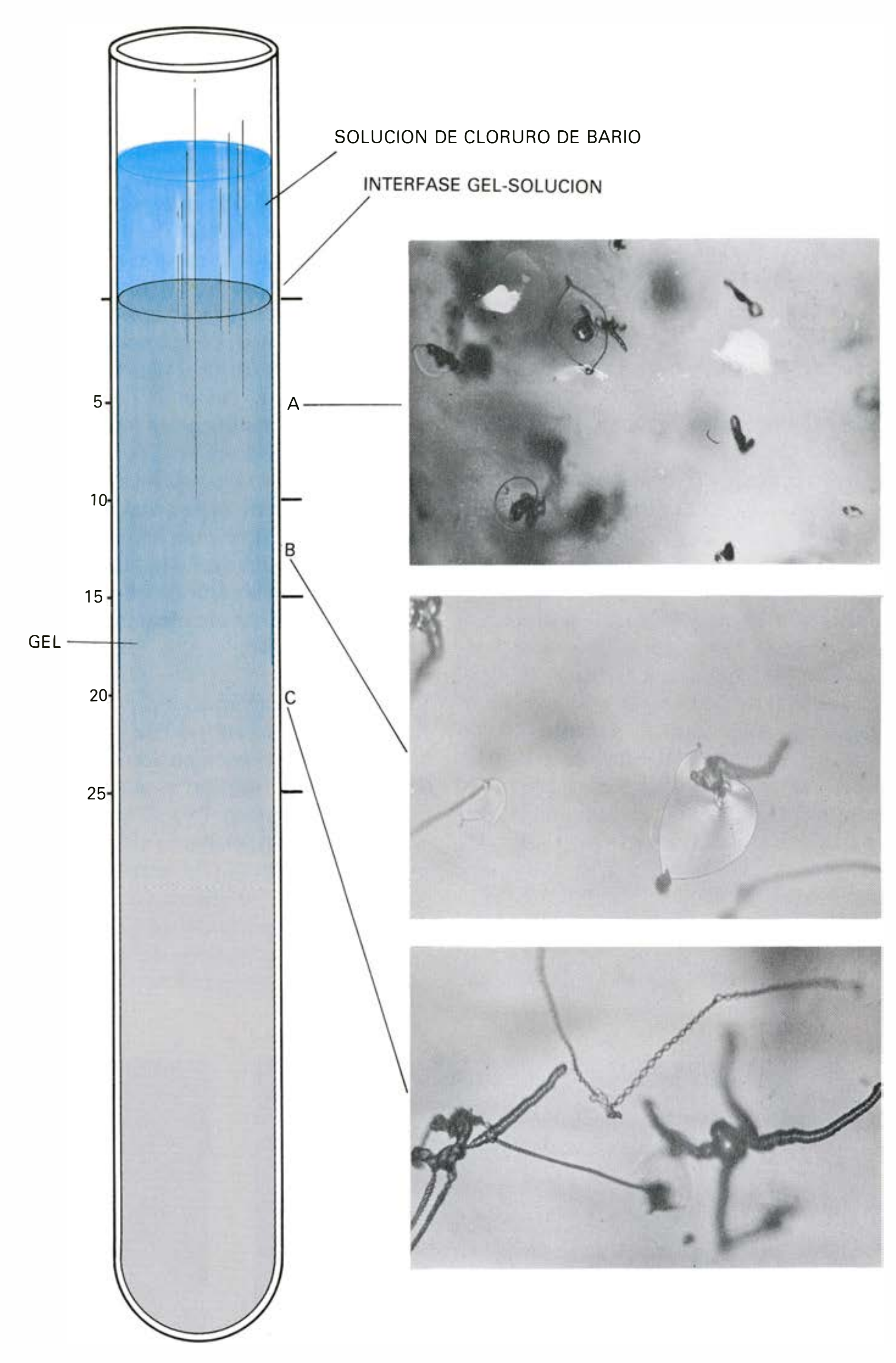
La especificidad, o carácter exclusivo de cada especie, de las morfologías de los exoesqueletos en los seres vivos parece evidenciar, de acuerdo con el conocimiento aceptado en biología molecular, que el control último de la forma de la concha de un organismo esté regido y programado por su código genético. Esta afirmación es en realidad de poca utilidad cuando se quiere comprender los mecanismos físicos que son responsables de su formación. La pregunta que necesita respuesta es, en este caso, ¿cuáles son las leyes que gobiernan la nucleación y el crecimiento de los cristales de carbonato cálcico en la concha y qué disposición adoptan en ella para que pueda aparecer una configuración global con simetría diferencial? La respuesta no es inmediata ni fácil, y requiere en todo caso la utilización de experimentos ad hoc. Uno de los caminos que pueden ayudar a encontrar respuestas relevantes consiste en la simulación en el laboratorio del ambiente biológico donde crecen los cristales que integran las conchas. Esta simulación es posible mediante la utilización del método de difusión en geles, que constituye una sencilla técnica para la obtención de cristales de substancias insolubles. Los geles que se emplean pueden ser muy variados, pero en nuestro caso hemos recurrido al gel de sílice por su comodidad y facilidad de obtención, así como porque presenta ciertas propiedades que nos serán de utilidad y que describiremos más adelante.

La técnica de crecimiento de cristales en geles de sílice es uno de los más antiguos métodos de obtener monocristales de sustancias insolubles en agua. Se basa en provocar una reacción química en la cual se controla la velocidad de aporte de los reactivos que dan lugar a la sustancia insoluble. (Se llama velocidad de aporte a la cantidad de reactivo por unidad de tiempo que llega a la zona de reacción.) El aparato experimental que se necesita es de gran simplicidad y economía. En su variante más simple, consiste en un tubo de vidrio en forma de *U* cuyas ramas verticales son cortas y perpendiculares a una rama horizontal, más larga. En la parte horizontal del tubo se coloca una columna de gel de sílice que separa los depósitos verticales situados en sus extremos que sirven

para depositar cada una de las soluciones reactivos. Ambos reactivos se van difundiendo paulatinamente, a través del gel, hacia lo que se denomina zona de reacción; aquí, por lento aumento de concentración de ambos reactivos se alcanza una concentración crítica que inicia la nucleación, es decir, la formación de gérmenes cristalinos estables de un tamaño adecuado, a partir de los cuales tiene lugar el subsiguiente crecimiento de los cristales de la sustancia deseada. En otra variante, el gel contiene en su interior uno de los reactivos, mientras se va depositando una solución del segundo sobre él.

La técnica de difusión en gel conoció un espectacular desarrollo a comienzos de nuestro siglo gracias a los trabajos de precipitación periódica de Liesegang, pero quedó prácticamente relegada en el olvido hasta los años setenta, cuando gracias a la necesidad de obtención de monocristales de interés industrial volvió a tomar un nuevo empuje tanto teórico como práctico. No obstante, a pesar de que el fundamento de la técnica de crecimiento de cristales por difusión en geles es muy sencilla, estamos lejos de comprender exactamente la variedad de los resultados experimentales que con la misma se obtienen, por lo que en diversos laboratorios de distintos países se trabaja hoy en día en esa línea.

La utilización de esta técnica como medio de simulación analógica del crecimiento de biocristales es tan antigua como ella misma. Tenemos constancia de que, hace casi doscientos años, el médico australiano D'Ord se valió de ella para desarrollar *in vitro* cristales de oxalato y fosfato cálcico, que son los principales compuestos formadores de los cálculos renales. Desde entonces, en diversos laboratorios y en diferentes épocas se ha entrevisto reiteradamente la gran similitud que existe entre el ambiente donde crecen los cristales que integran la parte mineral de los organismos biológicos y el que aparece en la técnica del gel de sílice. En efecto, en esta técnica, los cristales crecen en el seno de una masa porosa y gelatinosa, físicamente similar a la parte blanda del organismo donde se produce la mineralización. En ambos casos, el transporte ocurre exclusivamente por difusión y se trabaja con soluciones muy diluidas que reaccionan para formar un compuesto débilmente soluble que termina por nuclear y crece sobre el gel. Sin embargo, para aproximar este modelo analógico a la realidad



MEDIANTE ESTE SENCILLO EXPERIMENTO pueden obtenerse agregados cristalinos de morfología inducida. En un tubo de ensayo donde inicialmente se ha formado un gel de sílice en *p*H 9.5 se vierte cuidadosamente una solución de cloruro de estroncio o cloruro de bario de concentración 0.5 Normal. Cuando al cabo de 10 días el experimento se da por finalizado, pueden diferenciarse cualitativamente tres zonas. En la zona A, la zona más próxima a la interfase gel-solución ($x = 0$), aparecen pequeños agregados cristalinos cuyas morfologías son predominantemente halteras y esferulitos. La zona B se caracteriza por el desarrollo laminar de los agregados, mientras que en la zona C aparecen las denominadas trenzas, cuyo tamaño y perfección crece con la distancia a $x = 0$. Aumento de las fotografías: 50 diámetros.

es necesario tener presente una nueva condición. La fracción mineral de un organismo invertebrado, es decir, un exoesqueleto, está compuesto de carbonato cálcico, aunque inmerso en una matriz orgánica. El papel que desempeña esta matriz, el llamado "efecto matriz", nos es desconocido, pero se ha apuntado la posibilidad de que actúe a modo de falsilla que controle el lugar de nucleación de los cristales de carbonato.

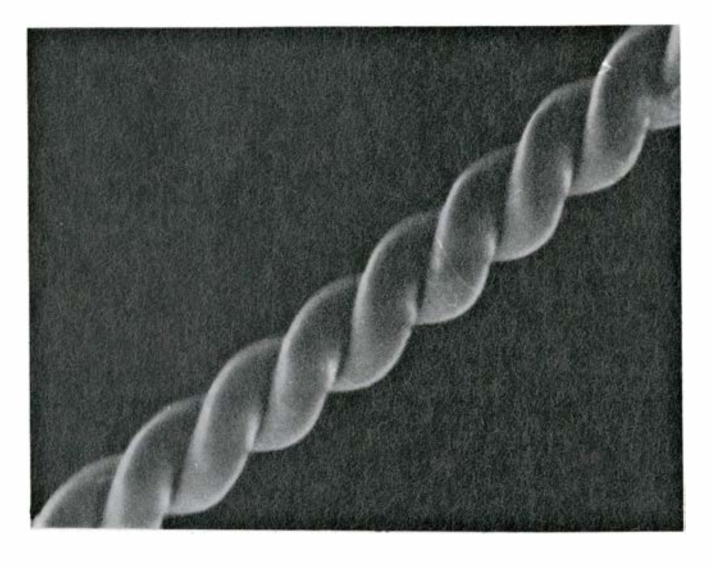
En nuestro laboratorio del departamento de cristalografía de la Universidad Complutense de Madrid, trabajamos sobre la posibilidad de generar agregados cristalinos de $CaCO_3$ que, como los de origen biológico, presenta-

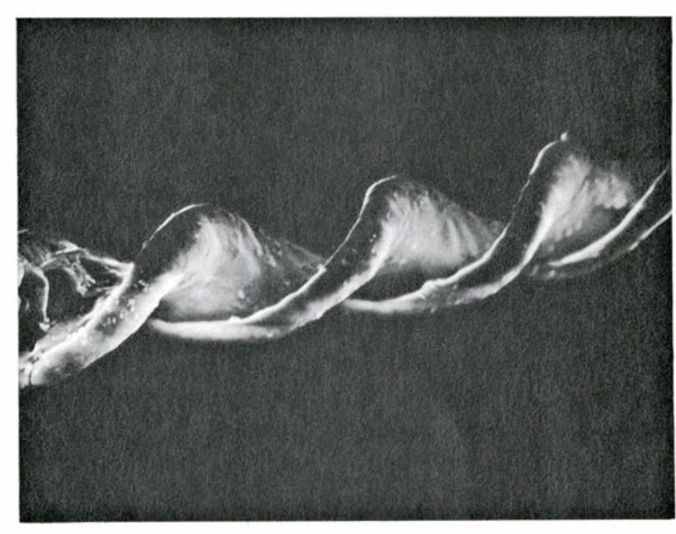
sen simetría diferencial. Pero el verdadero avance de nuestro trabajo se debió a una circunstancia bastante corriente en el trabajo de investigación: un error experimental.

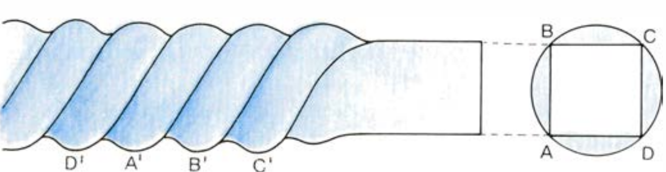
Durante el curso 1977-78 uno de nosotros (García-Ruiz) propuso a un grupo de alumnos la realización de una serie de ejercicios prácticos de laboratorio. Se trataba de obtener mediante la técnica citada cristales de sulfato de estroncio, un compuesto químico que, cristalizado, forma los exoesqueletos de un grupo de organismos denominados acantáridos. Siguiendo las ideas aceptadas sobre el funcionamiento de esta técnica de crecimiento de cristales, no era conveniente utilizar geles de sílice cuyo grado de acidez, o *p*H, fuera mayor que 8; en tales condiciones básicas, el gel interacciona químicamente tanto con los reactivos que se difunden como con los cristales de la nueva fase que se obtienen. Los alumnos montaron una serie de ensayos con arreglo al siguiente esquema. Colocaron en la parte horizontal del tubo de reacción descrito un gel de sílice y esperaron a su completa gelificación. En una de las ramas verticales depositaron una solución de cloruro de estroncio y, en la opuesta, una solución de sulfato potásico con lo que se esperaba obtener los cristales de sulfato de estroncio. Se realizaron diversas variantes experimentales cambiando la concentración de los reactivos y el *p*H del gel de sílice. Accidentalmente, y a pesar de que no era aconsejable, ciertos experimentos se realizaron con geles de *p*H mayor de 8, concretamente a 9,5. Cuando al cabo de las horas se observó que la reacción había tenido lugar, se estudió la nueva fase cristalina obtenida bajo el microscopio óptico, observándose la presencia de agregados cristalinos con curiosas morfologías. Todos estos agregados presentaban, bajo nicoles cruzados (es decir, cuando la lámina delgada conteniendo los agregados cristalinos es introducida entre dos polarizadores con nicoles cuyas direcciones de polarización de la luz son perpendiculares entre sí), la cruz de Malta típica de los agregados cristalinos orientados radialmente, y además, en la mayoría de ellos podían distinguirse fácilmente elementos de simetría diferencial.

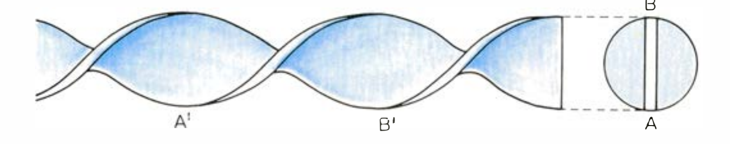
El análisis por difracción de rayos X realizado con objeto de identificar la naturaleza de esos curiosos agregados cristalinos resultantes nos reportó una nueva sorpresa. No se trataba de sulfato de estroncio, como se esperaba, sino de carbonato de estroncio, un compuesto que cristaliza con una estructura idéntica a la del aragonito, que es uno de los polimorfos del carbonato cálcico que se presenta en cantidades importantes en las conchas. No costó mucho deshacer esa paradoja aparente. El silicato sódico comercial que se utiliza para obtener el gel de sílice presenta, como impureza, una cantidad importante de grupos aniónicos derivados de la disolución del anhídrido carbónico en dicho producto. Se sabe que, a *p*H superior a 8,3, predomina el anión CO_3. Por tanto, en el gel formado existe una sustanciosa concentración de grupos carbonato que reaccionan con los iones Sr^{++} que se difunden en el gel antes de que los aniones sulfato tengan tiempo para llegar a la zona de reacción, dando así lugar a la formación de cristales de carbonato de estroncio, en vez del sulfato esperado.

Con el fin de comprobar la veracidad de la hipótesis, se diseñó un nuevo experimento de extraordinaria sencillez. En este caso, el gel de sílice se vierte en un tubo de ensayo corriente, y sobre él se deposita cuidadosamente una solución de cloruro de estroncio 0,5 normal. Con el tiempo, esta solución se difunde a través del gel y reacciona con el ion carbonato que se encuentra en la fase fluida de éste. Al cabo de cierto tiempo, se observa en el gel la existencia de unos agregados cristalinos que pueden extraerse de la masa gelificada para su estudio, y cuyas morfologías corresponden a las observadas en el primer experimento.







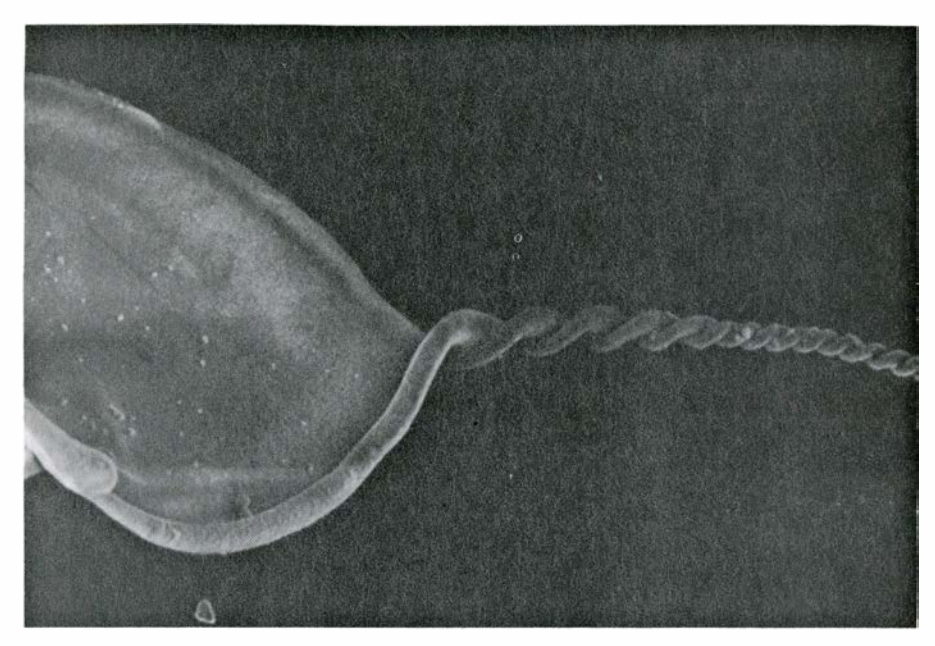


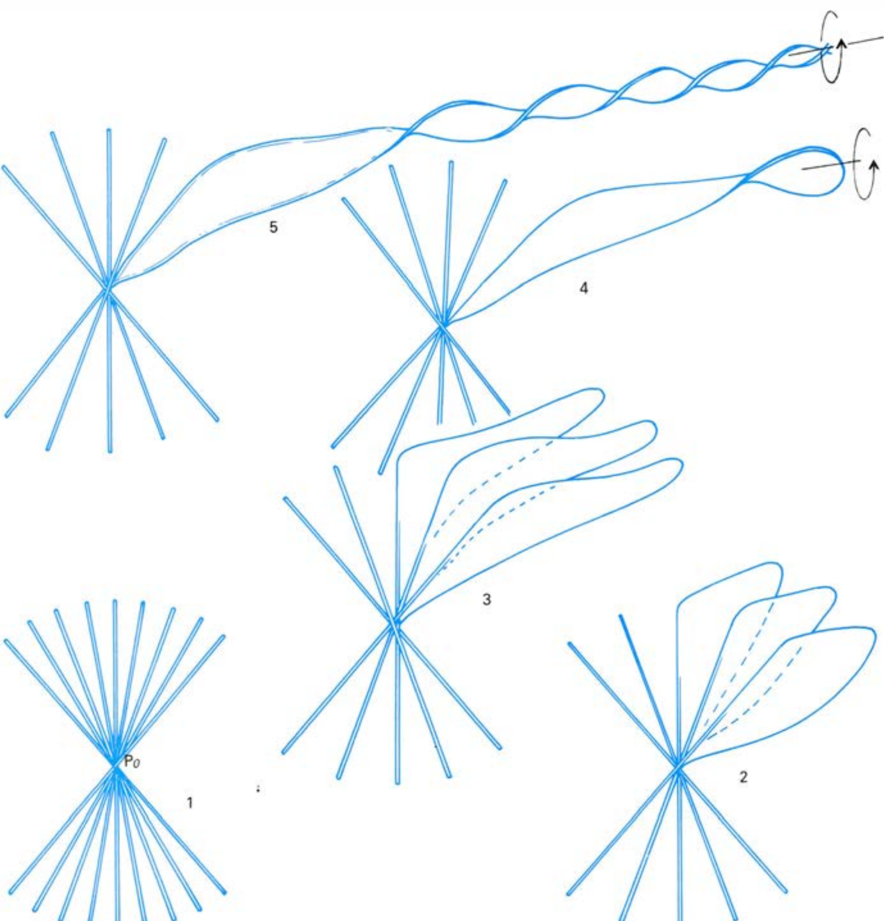
DOS TIPOS DE TRENZAS vistos mediante microscopía electrónica de barrido. El de la figura superior equivale a la torsión hacia la izquierda de una lámina o banda de lo que resulta una simetría de tipo ∞^{-}_{0} 2:2. El de la inferior equivale a la torsión también hacia la izquierda de un prisma de base cuadrada. Aparece entonces una configuración con simetría ∞^{-}_{0} 4:2. En el dibujo se han esquematizado las operaciones que generan ambos tipos de trenzas.

El estudio de las morfologías de los agregados cristalinos que aparecen a lo largo del tubo de ensayo permite distinguir tres zonas en el mismo, aunque ciertamente no existe solución de continuidad entre ellas. En la zona más próxima a la interfase gel-solución dominan los agregados en forma de haltera o haces; más lejos, aparece una zona caracterizada por la presencia de agregados cristalinos planos; y finalmente otra zona aún más alejada de dicha interfase, donde privan los agregados en forma de trenzas.

Estas últimas morfologías presentan los caracteres más distintivos de este tipo de agregado y por ello vamos a detenernos en su descripción. En primer lugar, el nombre de trenzas que les dimos obedece al aspecto que ofrecen cuando se observan bajo microscopía óptica. Sin embargo, cuando estas trenzas se estudian con microscopía electrónica de barrido, se hace evidente que este nombre no tiene ningún significado genético, sino tan sólo figurativo. Esta técnica permite distinguir claramente la existencia de trenzas de dos tipos diferentes. El primero de estos tipos responde cualitativamente a una simetría determinada por el producto de un eje helicoidal de orden infinito, ∞, asociado a un eje binario 2 y es equivalente a la simetría que presenta una banda o lámina sometida a una torsión a lo largo de su eje. El segundo tipo de trenza presenta también un eje helicoidal, pero esta vez asociado a un eje cuaternario 4, es decir, la misma simetría que resulta de torsionar una barra de base cuadrada. Para comprender la operación nos podemos ayudar de dos obras del escultor valenciano Andrés Alfaro. La primera de ellas denominada "My black brother", presenta una simetría exactamente igual a la que muestra nuestro primer tipo de trenza. Para conseguirlo, el escultor torsiona una lámina de hierro, hasta que la cara posterior es vista. En la segunda obra, denominada "Monumento al amor", el artista realiza la misma operación, mas partiendo esta vez de una barra prismática de base cuadrada. La simetría y la morfología que se consigue es idéntica a las del segundo tipo de trenzas. Un mecanismo análogo es el que utilizan estos agregados cristalinos para generar dichas trenzas.

La formación de trenzas no es más que un estadio en un proceso evolutivo general, tal como se deduce del estudio detallado de la variación de la morfología de estos agregados a lo lar-





PROCESO DE FORMACION DE UNA TRENZA. En primer lugar se origina un agregado en forma de haltera o haz (*1*). La morfología de esta primera fase ocurre a tamaños tan pequeños que es intuida, aunque con seguridad existe un punto singular, P_0, origen del agregado (*abajo, a la izquierda*). Posteriormente se produce un desarrollo lateral de una o varias espículas. A este desarrollo pueden contribuir simultáneamente todas las espículas con la formación de un doble cono o diábolo (*2*) o bien una o varias espículas (*3*). El proceso de crecimiento longitudinal y transversal de las espículas es simultáneo. Posteriormente, en un punto no singular P_t del borde del agregado se produce como efecto de su propio crecimiento una torisión (*4*) que se propaga dando lugar a una trenza (*5*). Los últimos estadios *4* y *5* pueden observarse en las microfotografías electrónicas de barrido que se muestran en la parte inferior. La simetría asociada a la trenza depende de la relación entre el espesor *e* y el paso *h* (es decir, la distancia entre dos puntos homólogos consecutivos). Si ambos son semejantes, la trenza será del tipo ∞^{-}_{0} 4:2 o ∞^{-}_{0}4. Si por el contrario *e* es pequeño frente a *h*, la trenza corresponde a ∞^{-}_{0} 2:2 o ∞^{-}_{0} 2. Esta relación *e*/*h* puede no permanecer constante a lo largo de una misma trenza, como ocurre por ejemplo en la que se indica en la figura, que comienza siendo ∞^{-}_{0}:4 para terminar, debido a la reducción del paso *h*, con simetría ∞^{-}_{0}:2.

go del tiempo. En general, la evolución de la morfología del agregado cristalino parece pasar por los tres estadios descritos. La fase inicial es un agregado cristalino, cuyos cristales aciculares se disponen radialmente en forma de diábolo o doble cono, en el que posteriormente una o varias acículas se desarrollan transversalmente hasta formar una superficie plana, en un punto no singular de cuyo borde se produce una torsión que resuelve el crecimiento ulterior del agregado en forma de lo que hemos venido llamando trenza.

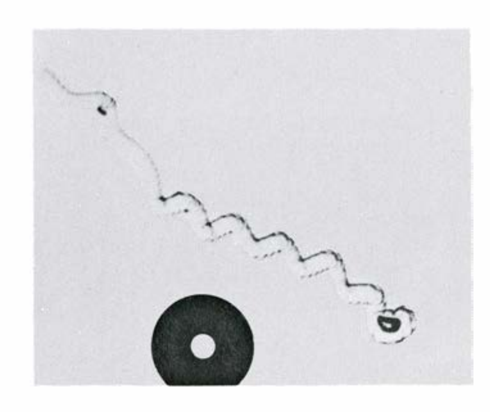
Mediante este mecanismo sencillo, se puede explicar la generación de la multitud de formas que aparecen en los agregados cristalinos crecidos por este método. En primer lugar, es fácil generar los dos tipos de trenzas cuando se caracterizan por sus elementos internos. Llamaremos *h* al paso de la trenza, es decir, la distancia entre dos puntos homólogos consecutivos dentro de ella. Por otra parte, sea *e* el espesor del agregado plano original. La relación *e*/*h* controla el tipo de trenza, de suerte que si la razón *e*/*h* se aproxima a la unidad la trenza será del tipo ∞^{-}_{0} 4:2, mientras que si *e* es menor que el paso, la trenza será del tipo ∞^{-}_{0} 2:2.

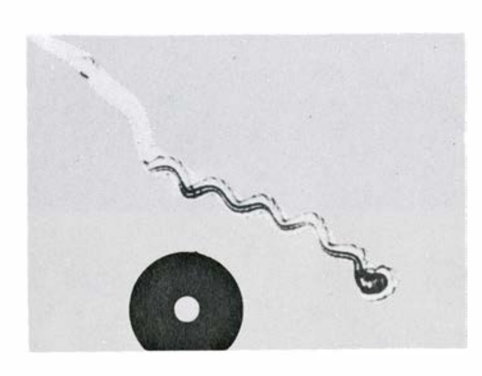
En muchos casos la torsión no se produce sólo en un punto del agregado plano, sino que tiene lugar en varios puntos del borde del agregado a la vez, con que aparecen extrañas y bellas morfologías de difícil descripción. Debido a ello, y como resultado de la forma inicial del agregado plano, el número y disposición de las trenzas, la longitud, paso y orientación de éstas, se desarrollan infinidad de variantes morfológicas.

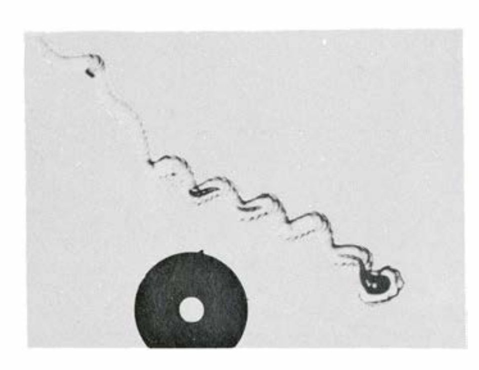
Es importante recordar en este punto que la simetría asociada a los agregados descritos difiere de la simetría isométrica desarrollada en la teoría del cristal.

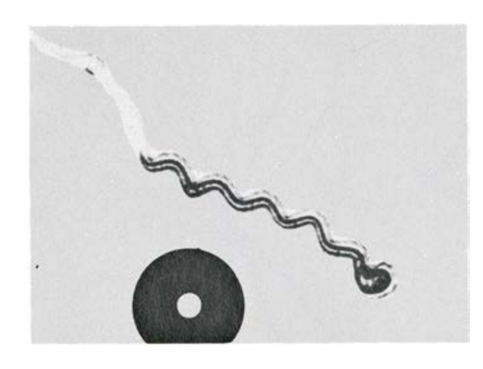
Veamos algunos ejemplos. Un eje de orden 5 es incompatible con un medio periódico como el de las redes cristalinas. Existe un gran número de demostraciones de esta incompatibilidad, pero quizá la más intuitiva y práctica sea la de tratar de rellenar un plano con pentágonos regulares y comprobar que se trata de algo simplemente imposible. Sin embargo, tanto en este tipo de agregados cristalinos, como en ciertos organismos (así, en la estrella de mar *Ophiotrix capillaris*), aparecen ejes de simetría de orden 5. Otro ejemplo, más llamativo, es el de los ejes helicoidales. La transformación consistente en la aplicación consecutiva (en cualquier orden) de una rotación alrededor de un eje de simetría y un desplazamiento a lo largo de la dirección del eje la realiza un operador que se ha dado en llamar eje helicoidal. Un eje helicoidal está caracterizado precisamente por la multiplicidad u orden *n* del eje de simetría y el valor de la traslación asociada al giro. La necesidad de que tras la operación de simetría la red cristalina permanezca invariante implica importantes restricciones al número de ejes helicoidales diferentes que pueden existir en los cristales, de tal forma que sólo puede deducirse la existencia de once de ellos. Así, un eje de simetría helicoidal de orden infinito, es decir, aquel en que cada rotación infinitesimal lleva asociada una traslación infinitesimal a lo largo del eje, es incompatible con un medio cristalino. Por el contrario, esa simetría es común encontrarla en multitud de exoesqueletos de organismos vivos tales como el de la concha de la *Turritella duplicata* y en los agregados cristalinos de carbonato de bario que se han obtenido en geles de sílice. Nótese además que en esa concha una nueva operación también incompatible con la estructura periódica de un monocristal se asocia a la rotación helicoidal. Se trata de una dilatación o extensión de centro *O* en el vértice o apex de la concha y que se refleja en la ley de progresión geométrica que afecta al paso de la hélice, es decir, a la relación entre las anchuras de las sucesivas espiras.

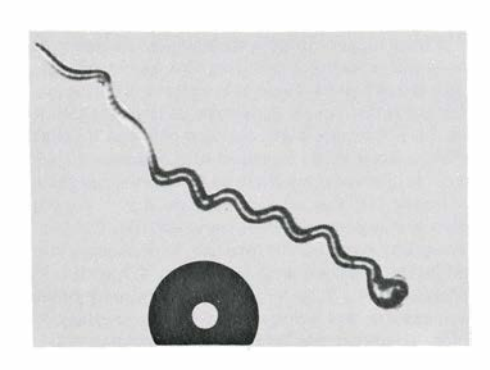
Así pues, dichas morfologías no pueden ser el resultado de relaciones cristal-cristal dentro del propio agregado, sino que, debido a las propiedades intrínsecas de su simetría, ha de inferirse que necesitan de un sustrato material externo a ellos que controle la nucleación, el crecimiento de los cristales y, en definitiva, la morfología final del conjunto del agregado cristalino. La existencia de este sustrato puede ponerse de manifiesto mediante un senci-











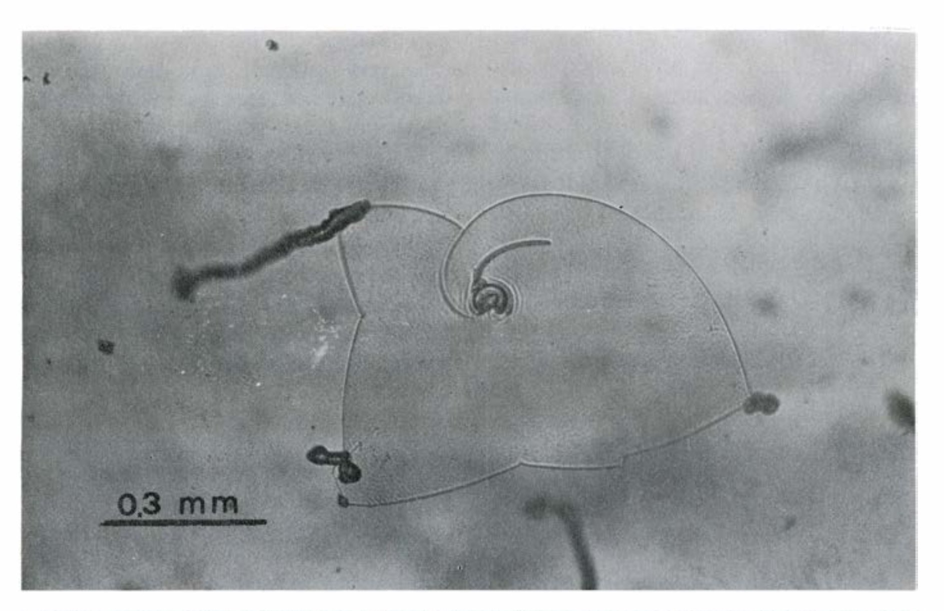
MORFOLOGIA GLOBAL de los agregados cristalinos de carbonatos metálicos crecidos en geles de sílice a *p*H básico. Dicha morfología está inducida por una membrana exterior a los cristalitos que forman la agrupación. Una vez extraído del gel uno de estos agregados, se coloca en un portamuestras y se vierte sobre él una gota de ácido clorhídrico diluido observando al microscopio la evolución del ataque. La serie de fotografías de *a* hasta *h* muestran la secuencia del proceso desde el inicio del ataque hasta la completa disolución del carbonato por el ácido. En este proceso de produce CO_2 gaseoso que se escapa en forma de burbujas (las esferas negras de la parte superior de las microfotografías). Terminado el ataque, queda una membrana fina, transparente y elástica, sinmorfa con el agregado inicial; es la inductora de la morfología.

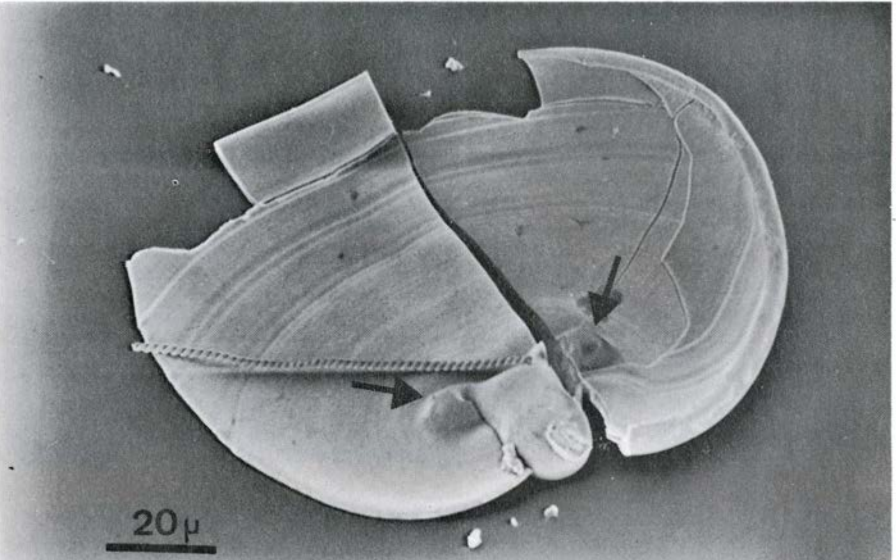
llo experimento. Tomemos uno de estos agregados, por ejemplo una trenza, y coloquémoslo sobre un portamuestras de vidrio excavado. Cortemos uno de sus extremos cuidadosamente y depositemos sobre él unas gotas de ácido clorhídrico. Observaremos, al microscopio óptico, el leve burbujeo de dióxido de carbono que indica la disolución del carbonato que forma el agregado cristalino. Cuando al final de la experiencia todos los cristales de carbonato hayan desaparecido, veremos que se conserva un molde o membrana cuya forma es idéntica a la del agregado inicial. El mismo experimento con el mismo resultado puede realizarse con otros tipos de morfologías, como agregados planos, esferulitos y otros.

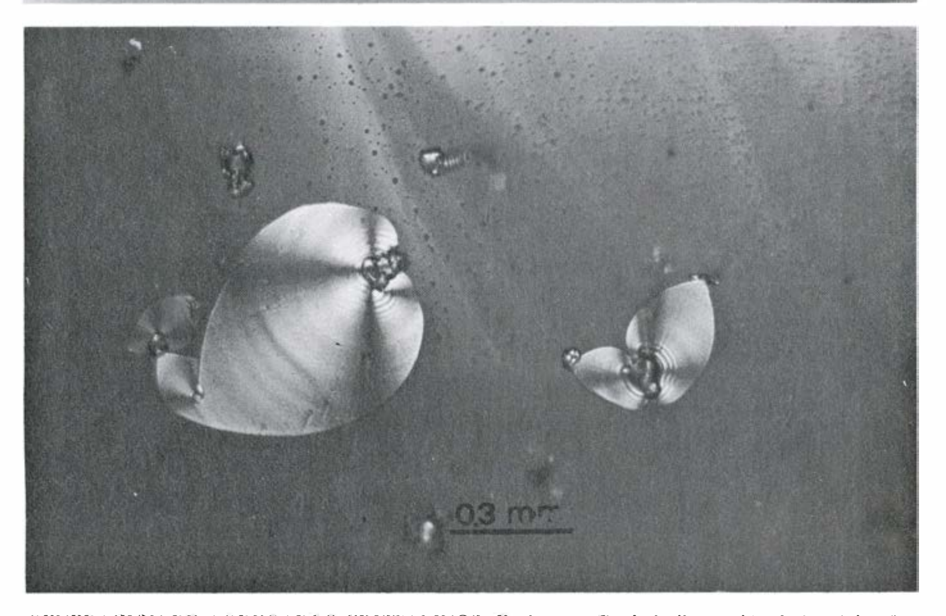
La existencia de este molde aparece más nítida si se utiliza microscopía electrónica de barrido. Estamos entonces ante agrupaciones de cristales en los que la morfología del conjunto no está determinada por relaciones cristal-cristal, sino por la presencia de un agente exterior morfogenético, en este caso una membrana. Por esta razón podemos llamar a estas formaciones agregados cristalinos de morfología inducida.

La presencia de una membrana con papel morfogenético constituye otro motivo de semejanza (además de la morfología, de la simetría y de la composición química y mineralógica) entre estos agregados cristalinos de morfología inducida y los exoesqueletos biológicos. A esta similitud se suma la fuerte analogía existente entre los ambientes físico y químico de formación en ambos casos, tal como exponíamos al principio de este artículo. No obstante, lo que nos hace abrigar mayores esperanzas sobre la aplicabilidad de posteriores estudios de estos agregados al problema de la biomineralización son sus características texturales.

Por textura de un agregado se entiende las relaciones cristalográficas y geométricas entre los distintos individuos que conforman la agrupación. El estudio textural de los agregados cristalinos de morfología inducida pone de manifiesto la complejidad de su proceso de formación. La diversidad de texturas es amplísima. Merece destacarse, sin embargo, que casi todas ellas pueden descubrirse entre el carbonato cálcico que forman las conchas. Así, cuando cortamos diametralmente un agregado plano de carbonato de estroncio (isomorfo con el aragonito) entreveremos la textura en empalizada formada por prismas pseudohexagonales, dis-



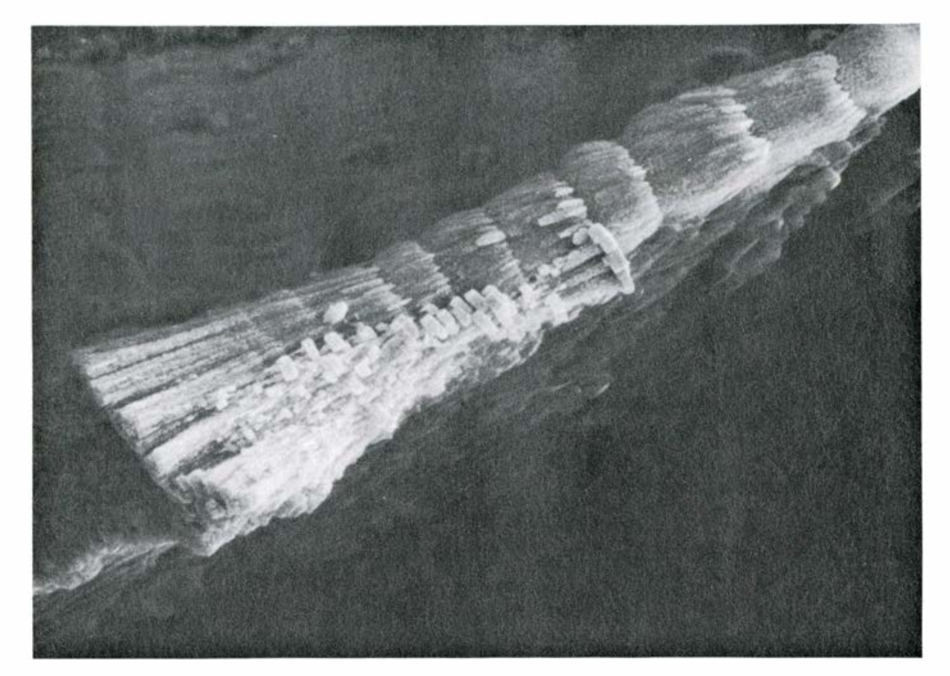


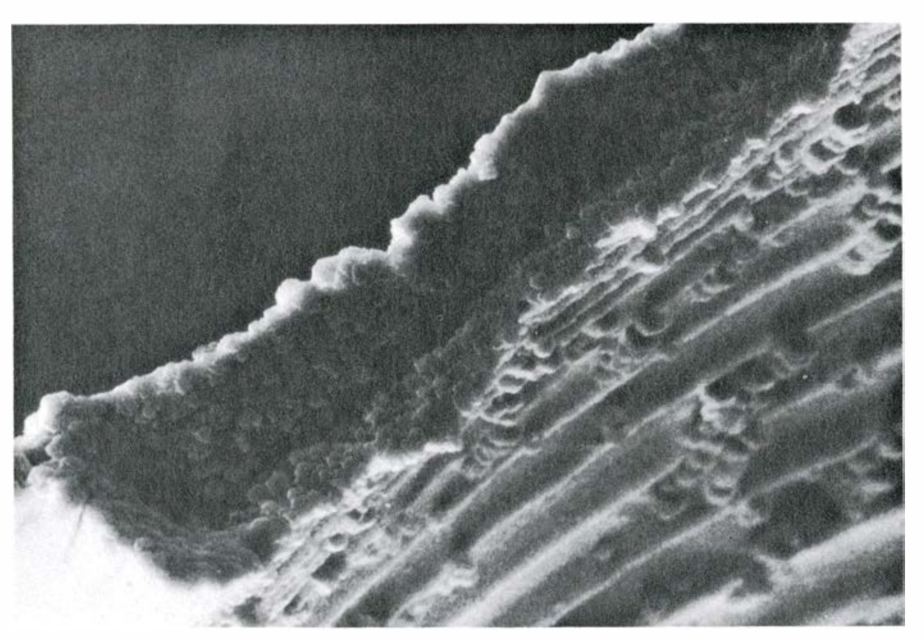


GENERACION DE AGREGADOS CRISTALINOS. En la zona B, de la ilustración de la página 9 se desarrollan fundamentalmente agregados cristalinos planos. En la parte superior (con nicoles paralelos) puede observarse un punto singular generador del agregado, que como muestra la microfotografía del medio (con nicoles cruzados) es el centro de la cruz de Malta típica de agregados cristalinos orientados. En ese punto se genera el bandeado concéntrico de crecimiento. En algunos agregados puede existir más de un punto generador (*abajo*). La trenza que aparece en esa figura inferior no pertenece a ella.

puestos paralelamente entre sí y situados entre dos membranas de polisilicato a modo de bocadillo. A veces puede observarse que los pequeños cristalitos no se encuentran en contacto entre sí. Es fácil hallar, en estos agregados, torsiones de toda la estructura de hasta 180 grados que pudieran intrepretarse como disclinaciones, es decir, como defectos de rotación que aparecen en superficies periódicas.

Tal como ocurre en agregados de origen biológico, es fácil observar con microscopía óptica la existencia de bandeados concéntricos en los agregados cristalinos de morfología inducida. Cuando nos servimos de la microscopía electrónica de barrido, se percibe claramente que cada una de estas bandas corresponde a una faja compuesta por un apilamiento de prismas pseudohexagonales de carbonato de estroncio, unidos por sus caras prismáticas, de suerte que la unión entre las bandas se produce a favor de las caras pinacoidales, es decir, por la base y el techo de estos prismas. No parece que, en estos casos, la textura permita la formación de trenzas. El centro de radiación de las bandas se encuentra situado en un punto singular del agregado que muestra simetría espiral. Se diría que este punto, centro de la cruz de Malta que se forma cuando se observan con nicoles cruzados, encerrase una gran importancia morfogenética. En ciertos casos, los cristales maclados de tipo aragonito se disponen paralelos unos a otros formando capas prismáticas. La textura conocida con el nombre de ladrillos y mortero, propia de los niveles nacarados de las conchas, puede observarse a veces en estos agregados.



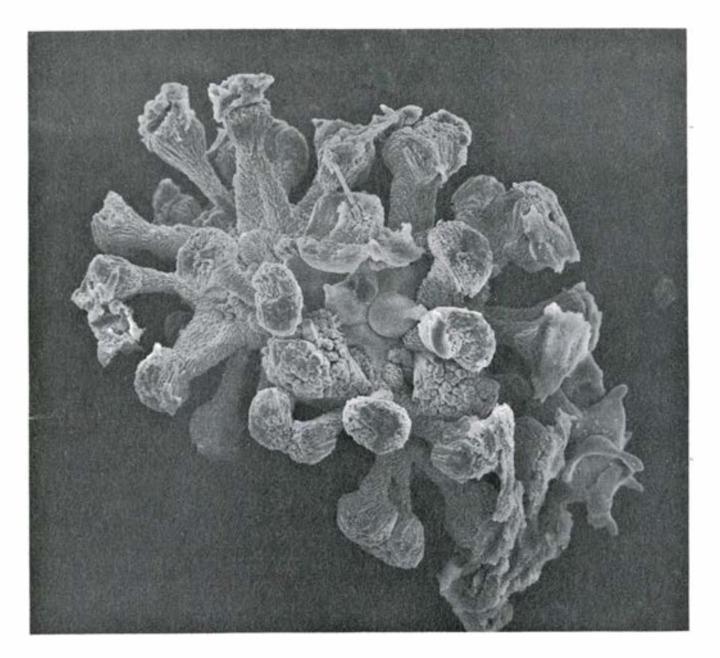


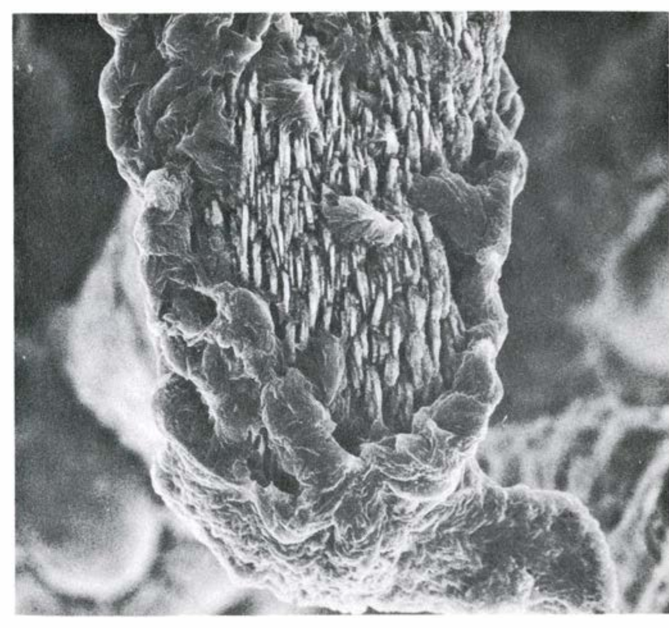
AGREGADOS CRISTALINOS de morfología inducida de carbonato de bario que muestran un claro bandeado concéntrico. Este bandeado es el resultado del proceso de crecimiento del agregado. La estructura de estas bandas se puede observar en la microfotografía inferior a mayor aumento. Como muestra el esquema, cada banda está compuesta por una acumulación de pequeños prismas pseudohexagonales de carbonato de bario, que se disponen paralelamente unos a otros uniendo sus caras prismáticas. La unión entre dos bandas se realiza por las caras pinacoidales (la base y el techo del prisma). Así, el frente de la última banda, presenta las secciones pseudohexagonales de los pinacoides tal como muestra la microfotografía inferior. Ambas microfotografías han sido obtenidas con microscopía electrónica de barrido.

Si en vez de depositar sobre el gel una solución de cloruro de estroncio, vertemos cloruro de calcio, se obtienen agregados de cristales de carbonato cálcico. En todos los ensayos realizados hasta el momento con esta técnica, esos agregados crecen en forma de calcita, componente mineral importante de los exoesqueletos a la que, en ocasiones, acompaña la vaterita.

¿Qué nos permite ello? Experimentar el efecto de las tres fases polimórficas del carbonato de calcio sobre la formación de agregados cristalinos de morfología inducida. La ordenación de átomos con estructura tipo aragonito se consigue con la precipitación de carbonato de estroncio y la de tipo vaterita y calcita con la precipitación del propio $CaCO_3$. Abordamos también el hecho de la precipitación polimórfica del $CaCO_3$, es decir, de que a partir de una solución de esta sustancia nuclee una u otra de las tres fases posibles; lo hicimos a través de esa técnica de crecimiento, aunque en geles de *p*H neutros. Nuestros estudios mostraron que la nucleación de una u otra fase resultaba del compromiso entre la simetría del polimorfo y la velocidad de acumulación de las unidades de crecimiento. Esta velocidad de acumulación es proporcional a la concentración de la solución inicial. Cabe explicar así la ausencia de aragonito en los agregados cristalinos de morfología inducida de $CaCO_3$ como un resultado de las condiciones de crecimiento. Y por ende, la necesidad de utilizar algún otro compuesto isomorfo con él, como el carbonato de estroncio o el carbonato de bario.

En el caso del $CaCO_3$ no se han obtenido jamás trenzas. Sin embargo, los agregados cristalinos producidos adoptan morfologías que presentan los





CUANDO EL GEL ES MAS ACIDO, la morfología que presentan los agregados cristalinos es distinta. Los que se muestran a la izquierda son de carbonato de bario y están obtenidos en geles de *p*H 8,5. Los cristales de $BaCO_3$ son laminares y se disponen uno junto a otro conectados por el pinacoide más desarrollado. En la ampliación de un detalle de la anterior (*derecha*), se aprecia la empalizada de láminas, recubierta por agrupaciones de polisilicatos.

mismos elementos de simetría diferencial que los exoesqueletos minerales. En ellos aparecen también con frecuencia el bandeado de crecimiento; aunque observado con microscopía electrónica este bandeado muestra una textura muy distinta. Cuando uno de estos agregados se corta sagitalmente con respecto al plano que presenta el bandeado, se advierte en él una serie de huecos dispuestos periódicamente. Cada uno de estos huecos corresponde a la unión de dos "gavillas" de cristales de calcita unidas por sus bases: cada banda está constituida por la unión de gavillas dispuestas lateralmente unas junto a otras. La morfología de estas gavillas indica que, en el carbonato de calcio, la primera de las fases que nuclea sobre la membrana es la vaterita y que ésta se transforma, posteriormente, en calcita, el más estable de sus polimorfos en condiciones ambientales. Otro fenómeno frecuente es el de la asociación de cristales laminares de calcita en un agregado. Ciertas morfologías que recuerdan espículas de equinodermos están formadas como en ellas por agrupaciones de romboedros de calcita unidos por su eje ternario. Otro tipo de texturas observadas en agregados cristalinos de morfología inducida de carbonato cálcico son las texturas oolíticas. Se denomina ooide a la concentración mineral de forma esférica o subesférica en la que los cristales dispuestos radial o tangencialmente se distribuyen en un número determinado de capas concéntricas. Cada capa de éstas representa un período de crecimiento. Las texturas oolíticas se conocen, desde hace mucho tiempo, en los cálculos minerales que se producen anormalmente en el riñón y, sobre todo, en ciertos ambientes de sedimentación calcárea. Los geólogos atribuyeron su origen a zonas de alta energía, de aguas muy agitadas. Sin embargo, recientemente, dos investigadores australianos, James Ferguson y Peter Davies, han demostrado por vía experimental que pueden obtenerse tales texturas en medios de baja energía. Sugieren que su formación quizá se deba a polímeros ambifílicos de alto y bajo peso molecular. Mediante nuestra técnica, hemos sintetizado estas texturas en un medio en que el único mecanismo de transporte es la difusión, por lo que la agitación es nula y reducidos también a la mínima expresión los movimientos de solvente.

Independientemente de las propiedades físicas y químicas y del interés tecnológico que puedan tener los agregados cristalinos de morfología inducida parece plausible una estrecha relación entre estos agregados cristalinos y los que se forman en organismos vivos por un proceso de mineralización, tanto patológica (cálculos renales, biliares, etcétera) como normal (endo y exoesqueletos). Esta simulación analógica de laboratorio ayudaría a comprender ciertos aspectos oscuros de ese proceso. Por ejemplo: ¿qué papel desempeña el "fantasma" orgánico que aparece en las biomineralizaciones y que constituye el llamado efecto matriz? Recientemente, Stephen Weiner y Wolfie Traub, del Weizmann Institute of Science de Israel, han estudiado la posibilidad de la existencia de epitaxia entre los cristales de aragonito y las capas de matriz orgánica que los envuelve, es decir, que esta última actúe a modo de falsilla para la nucleación de los cristales de carbonato de calcio. Los diagramas de difracción de electrones de alta energía realizados en agregados cristalinos de morfología inducida parecen demostrar también la existencia de una nucleación epitáxica de los cristales de carbonato sobre la matriz de polisilicato. En ellos, los máximos de difracción corresponden a los planos reticulares de los cristales de carbonatos, si bien la geometría del diagrama es típica de una sustancia polimérica. Así, es posible que, tanto en los exoesqueletos de organismos vivos como en el caso de los agregados cristalinos de morfología inducida, la fracción mineral de carbonato represente principalmente el papel de fosilización de una estructura polimérica o matriz bidimensionalmente periódica que sería la responsable inicial de la morfología global del agregado cristalino en cuestión. Pero, a la vez, y tal como recientes experimentos demuestran, las posibilidades morfogenéticas de dicha matriz están ligadas a las condiciones fisicoquímicas de nucleación y crecimiento de los cristales de carbonato de calcio que forman el agregado y a las variantes polimórficas que presentan éstos.



GALAXIA ELIPTICA DEFORMADA NGC 1275, que domina el rico cúmulo de galaxias de Perseo. Se trata de una poderosa fuente de radioondas sita a 300 millones de años-luz. En la parte superior de esta misma página aparece como un borroso objeto central en una fotografía tomada con el telescopio de 5 metros de Monte Palomar. El diámetro de la mancha borrosa es de 80 segundos de arco. En la parte inferior aparece el mismo objeto en una radioimagen obtenida mediante la técnica de interferometría de muy larga base (VLBI). La resolución de la radioimagen es de 0,0004 segundos de arco; revela detalles 2500 veces menores que cualquiera de los que pueden observarse ópticamente. De borde a borde, la radioimagen cubre sólo 0,023 segundos de arco; a la misma escala, la totalidad de la galaxia de la imagen óptica tendría un diámetro de 175 metros. La construcción de la radioimagen exigió la correlación de observaciones simultáneas registradas en cinco lugares distintos, a saber: Owens Valley en California, Socorro en Nuevo México, Algonquin Park en Ontario, Green Bank en Virginia Occidental y Effelsberg en Alemania Occidental. La dirección de la campaña corrió a cargo del autor del artículo; con él colaboraron Martin S. Ewing y David Hough, del Instituto de Tecnología de California, R. Craig Walker, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, y Jonathan D. Romney, del Instituto Max Planck de Radioastronomía. La estructura menor de la radioimagen, que ha sido generada en pantalla de televisión, tiene una longitud de un año-luz y una anchura de 0,2 años-luz. Se la supone asociada con el motor central de la radioemisión.

Radioastronomía por interferometría de muy larga base

Con la ayuda de relojes atómicos, se combinan observaciones realizadas simultáneamente por radiotelescopios distantes miles de kilómetros. La resolución de tales observaciones es la mayor jamás alcanzada

Anthony C. S. Readhead

Los objetos más potentes del universo son las radiogalaxias y los quasars. Se están ahora observando en el mayor detalle mediante redes de radiotelescopios que se extienden a través de los continentes e incluso a través de los océanos. La tecnología que posibilita esas observaciones de gran resolución es la interferometría de muy larga base (VLBI, *V*ery *L*ong *B*aseline *I*nterferometry).

Las notables imágenes obtenidas mediante la interferometría de muy larga base están regidas por las mismas leyes físicas que se aplican a los telescopios ópticos. Para mejorar el poder de resolución de un sistema que forma imágenes, la abertura del elemento que recoge la radiación debe aumentarse con respecto a la longitud de onda de aquélla. En principio, separar dos puntos próximos resulta, pues, mucho más difícil con un radiotelescopio, que trabaja con longitudes de onda en el margen de centímetros a metros, que con un telescopio óptico, que funciona con ondas cuya longitud se mide en millonésimas de centímetro. Se llama poder separador, o resolución, a la mínima separación angular, medida en minutos o segundos de arco, que se puede detectar con el instrumento que observa. Para un telescopio, la resolución viene dada aproximadamente por la razón λ/D, donde λ es la longitud de onda de la radiación y D la abertura del telescopio. Cuando se trate de registrar rasgos pequeños de los objetos astronómicos, D tendrá el máximo valor posible para la longitud de onda particular a la que se va a hacer la observación.

Al final de la segunda guerra mundial, algunos de los jóvenes científicos que habían participado en el desarrollo del radar empezaron a aplicar las nuevas técnicas a la radioastronomía, un campo poco menos que virgen en aquel entonces. Lograr con los radiotelescopios poderes de separación comparables a la resolución de los telescopios ópticos debía parecer un sueño inalcanzable. El poder de separación de los grandes telescopios ópticos, bajo buenas condiciones de observación, es aproximadamente de un segundo de arco, algo así como el ángulo subtendido por una moneda pequeña a una distancia de cuatro kilómetros o por dos kilómetros a la distancia de la Luna.

Era fácil calcular que para obtener una resolución equivalente con un radiotelescopio que operase a una longitud de onda de un metro, por ejemplo, el diámetro de la superficie colectora habría de medir unos 240 kilómetros. De igual manera, un radiotelescopio con un diámetro de 330 metros (pura utopía en aquellos años, pero que hoy tiene el radio de la mayor radioantena que se ha construido) ofrecería una resolución no superior a 800 segundos de arco, lo que equivale a una cuarta parte del poder separador del ojo humano cuando mira a las estrellas en el cielo nocturno.

La diestra aplicación de las técnicas de radiointerferometría, combinada con la evolución de la tecnología de los ordenadores, ha conducido a poderes de separación inconcebibles en los primeros días de la radioastronomía. En los últimos años, los radioastrónomos han obtenido imágenes de algunos de los objetos del universo más alejados con resoluciones que se acercan a 0,0001 segundos de arco, aproximadamente la de un palmo a la distancia de la Luna. Esto constituye una mejora de unos cuatro órdenes de magnitud sobre la resolución de los telescopios ópticos asentados en la Tierra.

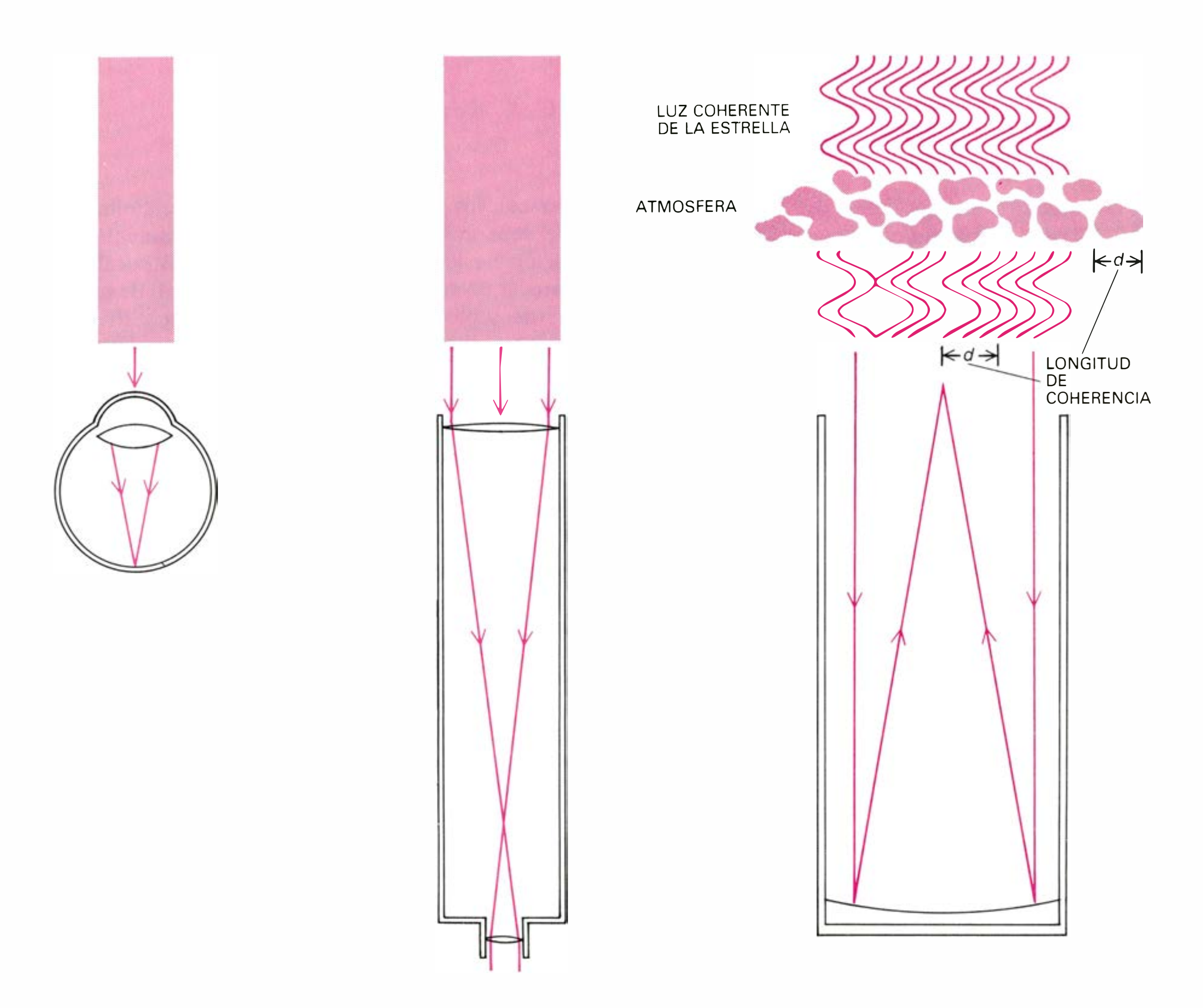
Y matizamos su asiento en el suelo porque la turbulencia de la atmósfera terrestre, el mismo fenómeno que hace titilar las estrellas, degrada la resolución teóricamente alcanzable con grandes espejos parabólicos. En principio, el telescopio de cinco metros de Monte Palomar debería tener una resolución de 0,023 segundos de arco. En la práctica, su resolución es sólo unas 10 veces superior a la de los mejores telescopios de Galileo: unos 10 segundos de arco. Sus instrumentos, a su vez, representaron una revolucionaria mejora de veinte veces respecto a la resolución obtenida cuando contemplamos el cielo nocturno a simple vista. Lo que desde luego hacen, y de manera brillante, los grandes telescopios ópticos de hoy día es recoger grandes cantidades de energía radiante en un pequeño intervalo de tiempo. Como "colector de luz", el telescopio de 5 metros de Monte Palomar supera a los telescopios de Galileo en un factor de aproximadamente 40.000. Cuando el Telescopio Espacial, de diámetro casi la mitad del reflector de Monte Palomar, se sitúe en órbita en 1985 por encima de la perturbadora atmósfera terrestre, su resolución deberá acercarse al valor teórico de 0,05 segundos de arco para un instrumento de su tamaño.

La resolución de 0,0001 segundos de arco que ahora se consigue en radiastronomía no vulnera la relación λ/D. La necesidad de hacer la abertura D muy grande se logra con la "síntesis de abertura", técnica en la que las radioondas recogidas por dos o más instrumentos separados por cientos o miles de kilómetros se registran simultáneamente y se suman después. La suma debe hacerse de una manera especial; es necesario ordenar las observaciones de manera que se conserven las relaciones de fase de las radioondas que llegan al telescopio y participan en la síntesis. Se dice entonces que las ondas son

coherentes. La intensidad de la radiación resultante de la suma será grande o pequeña según las radioondas incidentes estén o no en fase en los dos telescopios. Las ondas se hallan en fase si las crestas de las ondas llegan simultáneamente a los dos telescopios, y están en oposición de fase si un seno alcanza uno de los telescopios al mismo tiempo que una cresta llega al otro. Tal combinación de instrumentos se llama interferómetro.

Como la Tierra gira, la posición relativa de los dos radiotelescopios está en continuo cambio. Resulta así que la intensidad de señal a la salida del radiointerferómetro pasará rápidamente por una sucesión de máximos y mínimos cuando las radioondas procedentes del objeto celeste sujeto a observación están sucesivamente en fase en los dos telescopios y después en oposición de fase. Se llaman franjas de interferencia esos máximos y mínimos de intensidad.

La forma verdadera de la variación de intensidad es una onda sinusoidal. La amplitud (tamaño) y fase (posición) de la onda sinusoidal traen consigo información acerca de la estructura del objeto celeste a cierta escala angular, que depende de la lejanía entre los dos telescopios. Si la distancia entre ellos varía, se obtiene una configuración diferente, que aporta entonces información sobre la estructura angular del objeto celeste a diferente escala angu-



	OJO	TELESCOPIO DE GALILEO	TELESCOPIO DE 5 METROS DE MONTE PALOMAR
ABERTURA (MILIMETROS)	~5	~25	5,000
RESOLUCION (SEGUNDOS DE ARCO) TEORICA	~25	~5	~.025
RESOLUCION (SEGUNDOS DE ARCO) EFECTIVA	~200	~10	~1
PODER RELATIVO DE RECOGIDA DE LUZ	1	25	1 MILLON

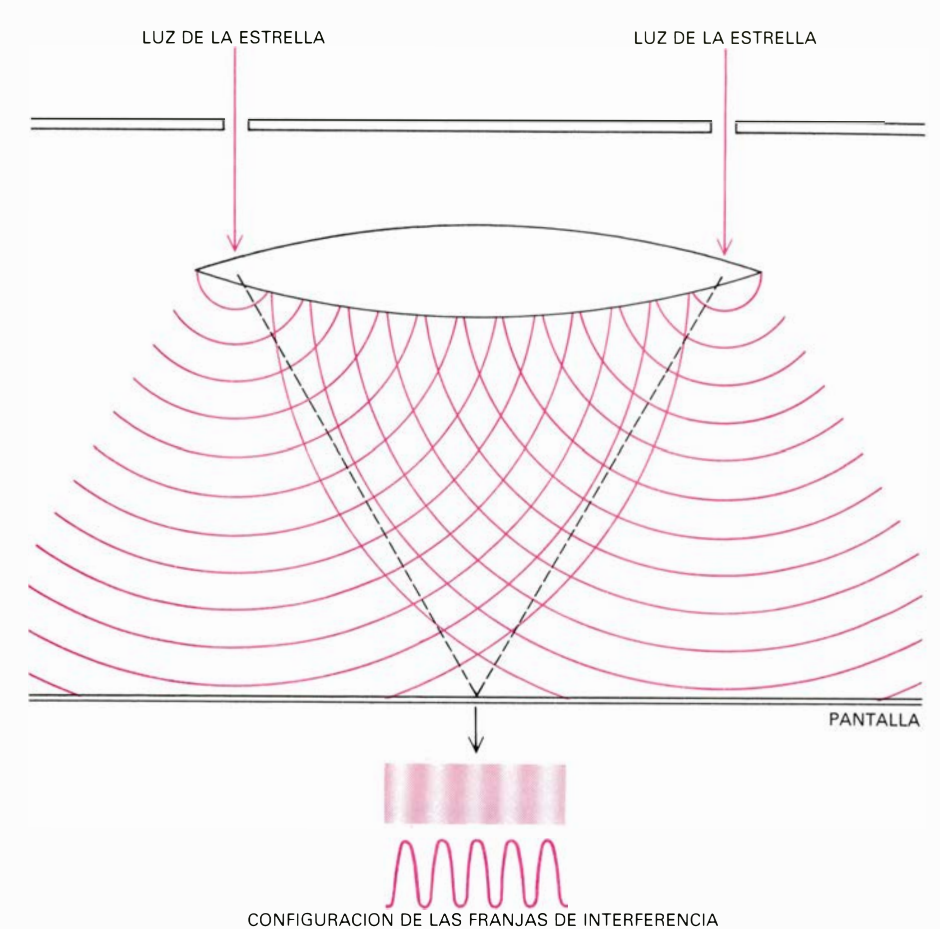
DOS FUNCIONES IMPORTANTES DE UN TELESCOPIO son recoger la radiación en una superficie grande y reunir la radiación procedente de puntos ampliamente separados. La primera función permite observar objetos que de otra suerte resultarían demasiado débiles para su contemplación a simple vista. La segunda función determina el poder de resolución del telescopio, o posibilidad de separar fuentes que serían indiscernibles en otro caso. El poder de resolución teórico de un telescopio, definido como el tamaño angular de los detalles más pequeños que pueden verse, viene dado por λ/D, donde λ designa la longitud de onda de la radiación y D el diámetro de la abertura. Según esta fórmula, el ojo humano, que posee una abertura de cinco milímetros, debería tener un poder de resolución de 25 segundos de arco, lo que es ocho veces mayor que el valor real cuando se mira a las estrellas en el cielo nocturno. Los mejores instrumentos de Galileo gozaban de una abertura de unos 25 milímetros y alcanzaban una resolución notable: 10 segundos de arco, aproximadamente la mitad del valor que teóricamente debería obtenerse. Esto representaba una mejora de veinte veces sobre la observación a simple vista. A causa de la turbulencia de la atmósfera terrestre, los telescopios ópticos modernos están limitados a un poder de resolución sólo 10 veces mayor que el obtenido por Galileo. Cuando la luz de una estrella alcanza la cima de la atmósfera, es coherente: todas su ondas están en fase. Después, las pequeñas células de turbulencia en la atmósfera retrasan algunas porciones del frente de onda más que otras, destruyendo así la coherencia de las ondas y deteriorando la imagen formada por el telescopio. La resolución queda establecida por el tamaño, d, de las células atmosféricas turbulentas, que es típicamente del orden del decímetro. Por tanto, la resolución a las longitudes de onda de la luz visible se encuentra limitada a λ/d, un segundo de arco aproximadamente.

lar. Cabe medir, pues, la configuración de las bandas de interferencia para cierto margen de separaciones de los telescopios y cubrir así cierto intervalo de escalas angulares en el cielo.

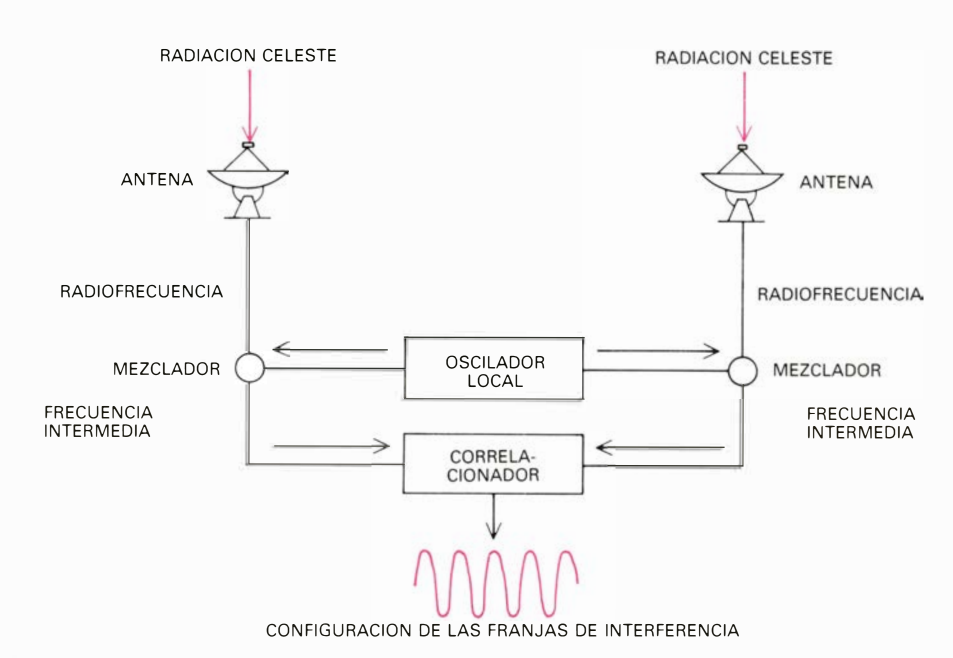
Las amplitudes y fases de las franjas, cuando se investigan para un gran número de separaciones de los dos telescopios, definen la función de visibilidad. Al someter esta función a la operación matemática conocida por transformación de Fourier, que convierte una curva de amplitud en relación con el tiempo en una curva de intensidad en relación con el ángulo, se obtiene directamente la imagen del objeto. Podemos llegar a la configuración de las bandas de interferencia para todas las separaciones de los dos telescopios y reducirlas a una separación dada D, y, consiguientemente, obtener la misma imagen que nos ofrecería un telescopio gigante único de diámetro D. Cuando se aprovecha la rotación de la Tierra para aumentar el número de separaciones, la operación resultante se llama síntesis de abertura con rotación terrestre.

Este método de construcción de imágenes por radiointerferometría fue desarrollado por Sir Martin Ryle y sus colaboradores, en la Universidad de Cambridge, por los años cincuenta. El método se ha aplicado extensamente; citemos tres ejemplos: en el Radioobservatorio Owens Valley del Instituto de Tecnología de California, en el Observatorio Westerbork de Holanda y en la Gran Distribución (VLA), conjunto de 27 radiotelescopios móviles cerca de Socorro, Nuevo México. Los radiotelescopios de esas zonas de observación están todos conectados directamente por cable o por guía de ondas y alcanzan resoluciones del orden de un segundo de arco.

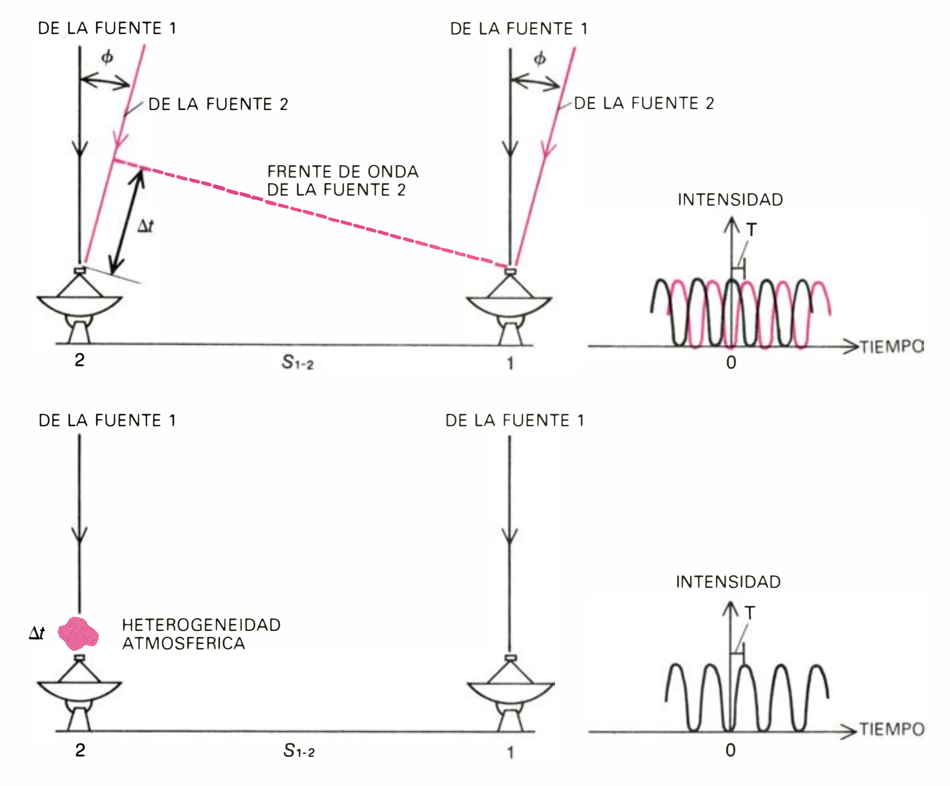
Para alcanzar resoluciones substancialmente superiores a un segundo de arco, es necesario que los radiotelescopios se hallen separados por cientos o miles de kilómetros. Tales instrumentos no se pueden conectar simplemente por cables. Esto constituía un problema, porque había que sincronizar las señales procedentes de los dos telescopios en un interferómetro con una precisión superior a una fracción de microsegundo antes de sumarlas. El advenimiento de relojes atómicos de alta precisión, a fines del decenio de 1960, hizo innecesaria la conexión material de los dos radiotelescopios y condujo al desarrollo de los interferómetros con línea base muy larga. En la interferometría de muy larga base, las señales se registran por separado con una exactitud del



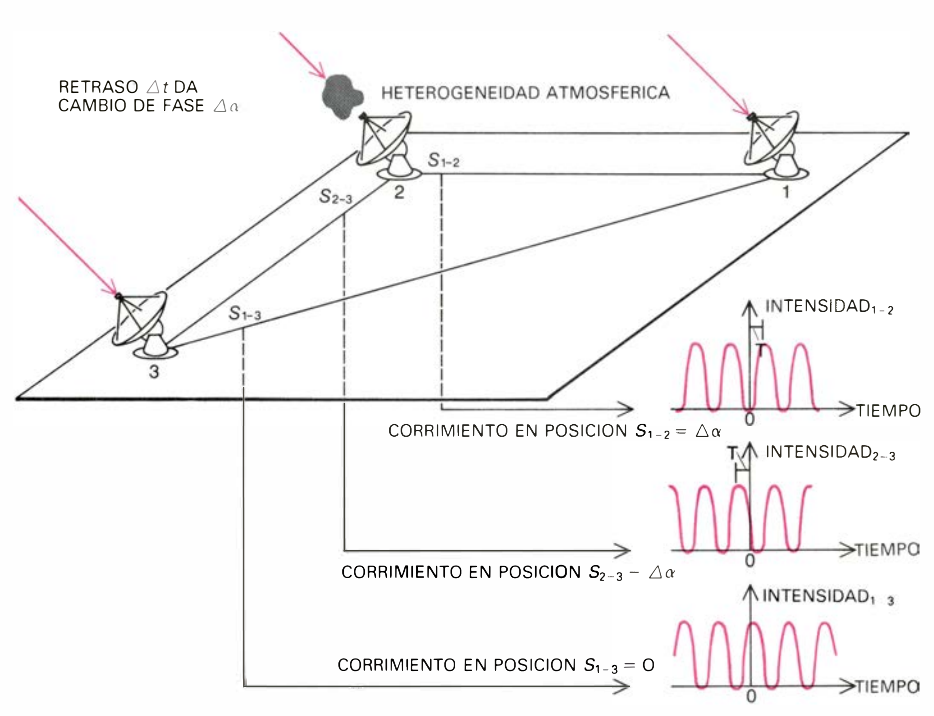
INTERFEROMETRO OPTICO, un instrumento que suma la luz procedente de dos puntos separados originada en una fuente común. Las ondas procedentes de los dos puntos interaccionan produciendo una configuración de "franjas" o "bandas" de interferencia. En las posiciones donde las crestas de las dos ondas coinciden, la interferencia es constructiva y da franjas brillantes. En las posiciones donde la cresta de una onda coincide con el seno de la otra, la interferencia es destructiva, lo que da por resultado bandas oscuras. La variación de intensidad entre las franjas luminosas y las oscuras sigue una curva sinusoidal.



CONSTITUYE EL RADIOINTERFEROMETRO un análogo cabal del interferómetro óptico. Si se observa una radiofuente celeste con un radiointerferómetro, la rotación de la Tierra hace que la onda que llega a los dos telescopios esté sucesivamente en fase y en oposición de fase al sumar las dos señales. La intensidad combinada de las señales sigue de nuevo una curva sinusoidal. Midiendo la amplitud (tamaño) y la fase (posición) para un gran número de separaciones de los telescopios, se puede "sintetizar" una abertura mucho mayor que la que ofrecen los telescopios. Los valores de la amplitud y fase definen una "función de visibilidad" que, después de una transfomación de Fourier, rinde una imagen.



LA TURBULENCIA atmosférica dificulta la determinación de la amplitud y la fase de las bandas de interferencia creadas cuando dos radiotelescopios, separados por una distancia S, se conectan para constituir un interferómetro S_{1-2}. En ausencia de turbulencia (*arriba*), la salida del interferómetro cuando está observando la fuente n.º 1 varía suavemente con el tiempo, debido a la rotación terrestre, pasando por el zénit en el instante $t = 0$ (*curva sinusoidal negra*). La radiación procedente de la fuente n.º 2, separada de la fuente n.º 1 por un pequeño ángulo (ϕ), produce una segunda configuración de franjas (*en color*) desfasada en una cuantía proporcional al ángulo ϕ. El frente de onda de la fuente n.º 2 llega al telescopio n.º 2 en un instante Δt después de haber llegado al telescopio n.º 1. Una heterogeneidad producida por la turbulencia (*abajo*) hace que el frente de onda de la fuente n.º 1 se retrase para llegar al telescopio n.º 2 en la misma cuantía, Δt, simulando el mismo corrimiento de la franja en la salida del interferómetro.



PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE LOS CORRIMIENTOS DE FASE, débanse a la atmósfera o sean causados por defectos instrumentales, hay que conectar los tres radiotelescopios al objeto de crear tres interferómetros S_{1-2}, S_{2-3} y S_{1-3}. Aquí, la onda que llega al telescopio n.º 2 ha sido retrasada, originando un cambio de fase igual y opuesto en los interferómetros S_{1-2} y S_{2-3}. Las franjas en el interferómetro S_{1-3} no quedan afectadas por la perturbación en el telescopio n.º 2. Cuando se suman las fases en el circuito para obtener entonces la "fase de clausura", los corrimientos de fase introducidos por la atmósfera se anulan exactamente. La fase de clausura contiene sólo información de la estructura.

microsegundo en ambos lugares sobre la misma clase de cinta magnética usada para registrar imágenes de televisión. Las cintas se envían entonces a una central donde se sincronizan y se combinan las señales.

Para obtener una imagen de una radiofuente celeste por síntesis de abertura, hay que medir la amplitud y la fase de las franjas de interferencia. La dificultad reside, sobre todo, en establecer la fase. Gran parte del esfuerzo empleado en obtener buenas imágenes por síntesis de abertura se emplea en estabilizar la fase del conjunto de telescopios en el radiointerferómetro. Incluso después de construido un conjunto con errores instrumentales mínimos, quedan todavía por abordar las fluctuaciones de fase causadas por la atmósfera y, a las radiofrecuencias más bajas, por la ionosfera terrestre y el medio interplanetario.

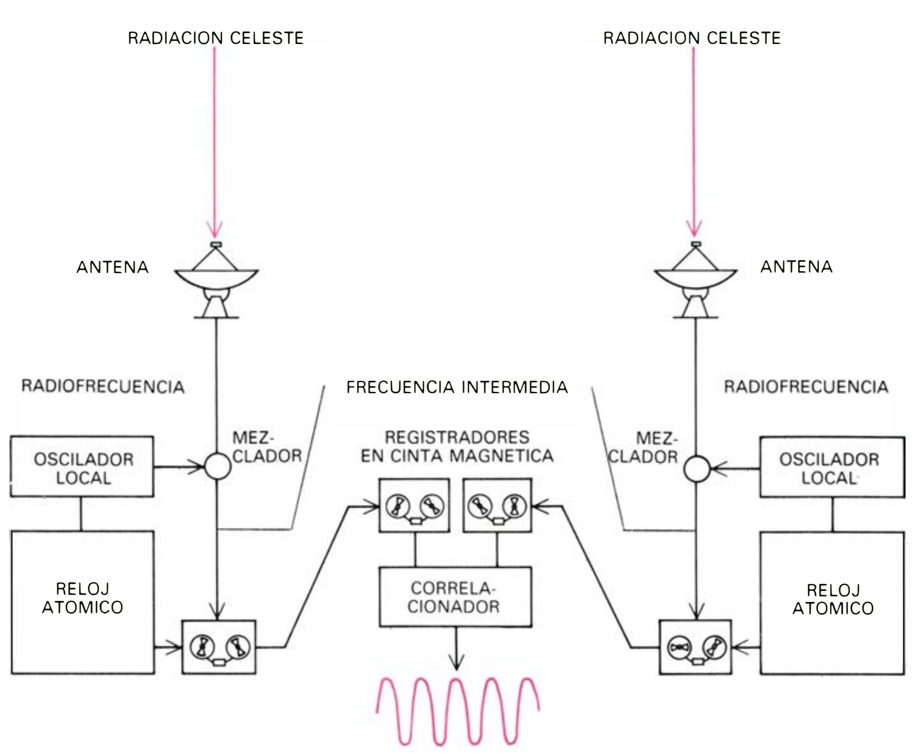
Las variaciones de fase debidas a la atmósfera y a la ionosfera no se pueden eliminar por mera calibración, aun cuando los telescopios se encuentren a pocos kilómetros de distancia. En la interferometría de muy larga base, que permite alojar los instrumentos en continentes distintos, la fase de las bandas de interferencia se corrompe no sólo por la atmósfera y la ionosfera, sino también por saltos aleatorios y derivas lentas en los relojes atómicos y por ignorancia de la distancia precisa entre los focos de los dos telescopios. Cada una de esas variaciones o incertidumbres tiene el mismo efecto que el retardo o aceleración del frente de onda que llega a uno de los telescopios, haciendo que las franjas fluctúen en posición hacia delante y hacia atrás e infecten la medida de la fase.

A lo largo de los últimos cinco años se ha aplicado cierto número de métodos para superar este problema. De ellos, dos sólo sirven cuando el objeto celeste en observación está formado por fuentes puntuales aisladas. Se les llama corrientemente cartografiado de la oscilación de las franjas y cartografiado de la fase; no hemos de confundirlos con el cartografiado de la síntesis de abertura, válido para cualquier fuente compleja. Por fortuna existen objetos de gran interés astrofísico que poseen cierto número de componentes puntuales aisladas y se pueden cartografiar, por tanto, a través de los dos métodos aludidos. Describiré brevemente el cartografiado de algunas fuentes de esas, antes de proseguir con el cartografiado de otras más complejas.

Los efectos instrumentales y atmos-

féricos que contaminan la determinación de fase se pueden eliminar si el objeto es una fuente puntual brillante o si hay una fuente puntual brillante en su vecindad. Una fuente puntual tiene inherentemente fase cero; y, por consiguiente, cualquier desviación en la posición de las franjas observada para esa fuente debe ser originada por la atmósfera, el instrumento de observación o por ambos. Todo cuanto necesitaremos para rechazar el efecto espurio será restar las fases determinadas para la fuente puntual próxima de las fases medidas en el objeto. Una fuente puntual así utilizada se llama referencia de fase.

De entre las fuentes puntuales brillantes que destacan más, algunas se han hallado en las nubes de gas alrededor de estrellas antiguas en regiones de gestación de nuevas estrellas. En ambos casos, las fuentes puntuales son regiones pequeñas dentro de las nubes gaseosas en que las moléculas de agua, la molécula hidroxilo (OH) o el monóxido de silicio (SiO) están emitiendo intensa radiación a frecuencias precisas. Tales fuentes se conocen como máseres cósmicos, porque imitan las propiedades de una clase particular de amplificador que, por coincidencia, se usa mucho en radioastronomía. (Máser es acrónimo inglés de amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación.) Se han descubierto varios cientos de máseres cósmicos desde que se identificó el primero en 1965.



MEDIANTE RELOJES ATOMICOS DE ALTA PRECISION se hace innecesaria la conexión física de dos o más radiotelescopios en el sistema y viabilizan la interferometría VLBI. En cada punto donde está situado un telescopio, la señal de radiofrecuencia procedente de la fuente celeste se registra en cinta vídeo a una velocidad de cuatro millones de muestras por segundo, junto con señales de tiempo periódicas generadas por el reloj atómico local. Las cintas se vuelven a pasar en un procesador central para extraer la configuración de las franjas de interferencia y deben sincronizarse a una fracción de microsegundo.

La alta resolución proporcionada por las observaciones VLBI ha suministrado información estructural acerca de los máseres cósmicos a escalas que descienden hasta los 10^8 kilómetros, aproximadamente el radio de la órbita terrestre. A partir de los corrimientos Doppler en la frecuencia de la radiación del máser, se puede medir la velocidad radial de las nubes que actúan de máseres. Además, observando la polarización de las señales VLBI procedentes de máseres en regiones donde se están formando estrellas, se determina la intensidad de los campos magnéticos asociados a las nubes en proceso de colapso para formar estrellas. El método fue utilizado en primer lugar por James M. Moran, Jr., y sus colaboradores del Centro de Astrofísica del Observatorio de Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano.

Los primeros mapas que mostraban la disposición de los máseres de agua fueron construidos por R. Craig Walker, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, y sus colaboradores del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del Centro de Astrofísca. Estos investigadores cartografiaron los máseres en la nube gaseosa designada por W51 en la constelación del Aguila. Más recientemente, en una región de la Gran Nebulosa de Orión donde se están formando nuevas estrellas, un grupo que trabaja con Reinhard Genzel, a la sazón en el Centro de Astrofísica, cartografió el movimiento propio (movimiento real a través del cielo) de unos 40 puntos máser bien definidos. Para los máseres de Orión, el movimiento propio es aproximadamente 0,01 segundo de arco por año. El grupo determinó también el movimiento radial de los máseres (movimiento según la visual) a partir del corrimiento Doppler de cada mancha. Estas medidas, combinadas con las posiciones determinadas con gran exactitud, muestran que los máseres de agua se encuentran en nubes que se mueven a una velocidad de 18 kilómetros por segundo hacia la parte exterior de la vecindad de dos fuentes enmascaradas de radiación infrarroja, llamadas IRC 2 e IRC 4.

Recientemente, Mark J. Reid y sus colaboradores del Centro de Astrofísica han determinado el movimiento de los máseres de hidroxilo en regiones de formación de estrellas en la nube de gas W3 en la constelación de Casiopea. Con la ayuda de ocho radiotelescopios, siete en los Estados Unidos y uno en Canadá, han cartografiado 14 regiones de máseres de hidroxilo en W3 con una resolución de 0,01 segundos de arco. Los máseres se observan proyectados frente a una brillante nube de hidrógeno ionizado cuya energía procede de una joven estrella enmascarada. Reid y su grupo han construido un modelo dinámico que muestra que los máseres de hidroxilo están cayendo hacia la estrella central a una velocidad de cinco kilómetros por segundo. Los máseres son evidentemente los restos de una envoltura de acumulación que se halla todavía colapsando en la estrella que se está formando y su nube circundante de hidrógeno ionizado. Con métodos semejantes, Aubrey D. Haschick y sus colegas, del Centro de Astrofísica y el Observatorio Haystack del MIT, han cartografiado los máseres de hidroxilo en la región de formación de estrellas W75N en la constelación del Cisne. Sugieren que los máseres se han formado alrededor de un sistema joven de estrellas binarias.

Una de las aplicaciones más prometedoras de este trabajo es la determinación directa de distancias en casos especiales. Podemos calcular, por ejemplo, a qué distancia se hallan los máseres de

agua de Orión, porque parece ser que las manchas se están expandiendo homogéneamente a partir de un punto. La expansión puede determinarse así sirviéndonos del método del "paralaje del cúmulo en expansión". Introduciendo las velocidades radiales observadas, los movimientos propios y las posiciones exactas en un modelo de expansión homogénea, se puede determinar la posición de cada mancha en profundidad con respecto al centro de expansión. Conociendo la posición tridimensional de cada mancha, el modelo de expansión permite hallar su movimiento transversal. La distancia a la región entera se establecerá ajustando los movimientos propios observados, que son velocidades angulares, a los movimientos transversales deducidos, que son velocidades verdaderas. Realizado esto para cada mancha de máser de agua, la solución óptima nos la ofrecerá un ajuste por mínimos cuadrados de todas las manchas. Mediante este método se halla que la distancia a la nebulosa Orión es de 1550 ± 250 años-luz.

Recurriremos a otro método de determinación de distancia, el del "paralaje estadístico", cuando el movimiento de los máseres sea aleatorio. Se compara aquí la dispersión de las velocidades radiales, obtenidas a partir de los corrimientos Doppler, con la dispersión de los movimientos propios, obtenidos a partir de observaciones en instantes distintos. La relación de las dos dispersiones da directamente la distancia. El método se ha aplicado a los máseres de agua en la región de formación de estrellas W51. Genzel, Matthew H. Schneps y sus colaboradores en el Centro de Astrofísica han mostrado que este cúmulo de máseres dista de nosotros 23.000 ± 5000 años-luz.

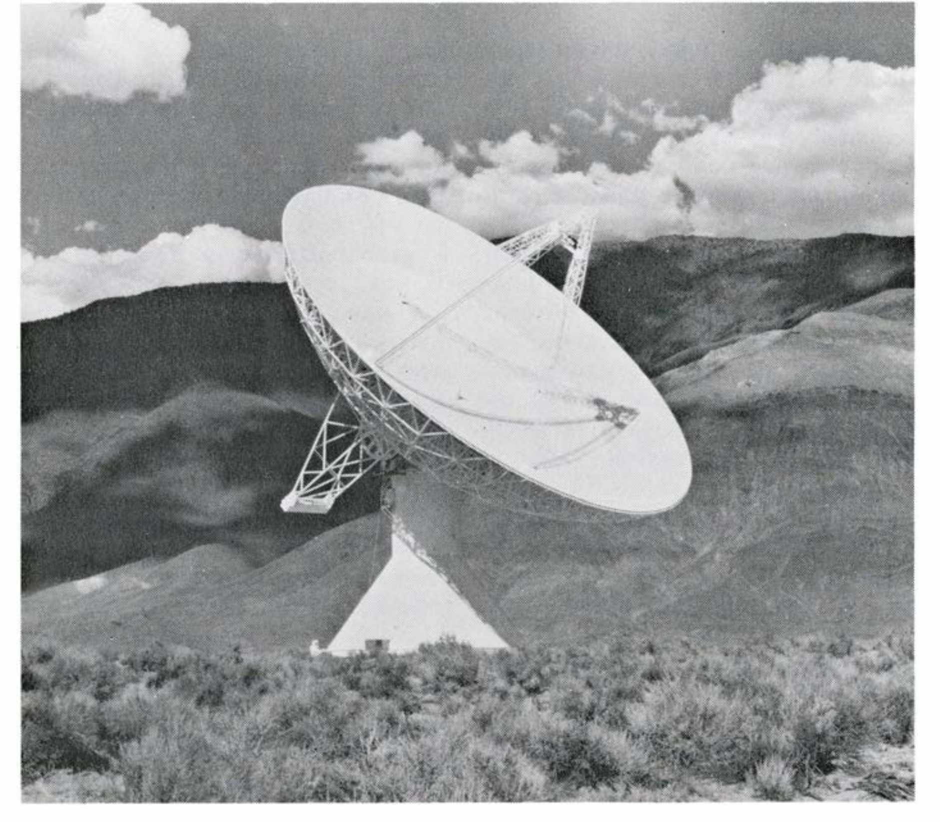
Estos nuevos métodos permiten determinar la distancia con un error del 10 al 20 por ciento. Son importantes porque eluden muchos de los problemas de los métodos astronómicos tradicionales de determinación de distancias; pueden aplicarse en toda la galaxia. Más aún. Acaban de detectarse máseres de agua en una galaxia espiral próxima, M33 en el Triángulo, lo que significa que los nuevos métodos valen igualmente para galaxias próximas.

Por desgracia, los métodos de síntesis de abertura, que tienen tanto éxito en lo referente a fuentes puntuales brillantes, no se pueden aplicar a la cartografía de fuentes más extensas: quasars y galaxias emisoras de radioondas. Salvo en contados casos especiales, no hay fuentes puntuales convenientemente situadas en esos objetos o cerca de ellos para servir de referencias de fase. De aquí que hasta 1957 se creyera improbable que la interferometría de muy larga base llegara a suministrar buenas imágenes de las poderosas radiofuentes extragalácticas. Mas, como ocurre con tanta frecuencia, las limitaciones de los métodos establecidos condujeron a un nuevo método que podría haber sido aplicado con provecho a la interferometría convencional años antes.

El avance decisivo llegó con la aplicación de una idea que había permanecido en letargo durante más de 20 años. En 1953, Roger C. Jennison, estudiante de segundo ciclo en el Radioobservatorio de Jodrell Bank en Inglaterra, vio que se podía deducir información acerca de la estructura de una radiofuente, aun cuando la información relativa a la fase estuviera fuertemente contaminada. Advirtió que si se sumaban las fases de la franja de un circuito cerrado de tres o más interferómetros, todas las contribuciones espurias debidas a los efectos de propagación y a los errores instrumentales se anularían exactamente. La suma de fases resultante contendría tan sólo información de la estructura del objeto en observación.

Esto se produce de la manera siguiente. Considérese un sistema de tres telescopios 1, 2 y 3, conectados en un sistema triangular en que cada uno de cuyos lados sea un interferómetro. Hay pues tres interferómetros –los telescopios 1 y 2, los telescopios 1 y 3 y los telescopios 2 y 3–; cada interferómetro genera su propia configuración de franjas de interferencia. Si la atmósfera retrasa la onda que llega al telescopio 2, ello no afectará a las franjas del interferómetro 1-3. Las franjas de los interferómetros 1-2 y 2-3, sin embargo, serán desplazadas cada una en cuantía igual y opuesta a la otra. Puede verse, por tanto, que si las fases en el conjunto del circuito cerrado se suman entre sí, los corrimientos de fase se anulan exactamente. El mismo argumento se aplica a un retraso asociado al telescopio 1 o al telescopio 3.

En la misma cuenta caería en 1974 Alan E. E. Rogers, del Observatorio Haystack, quien inicialmente desconocía el trabajo anterior de Jennison, y la aplicó a la interferometría de muy larga base. Rogers llamó a la suma de las fa-

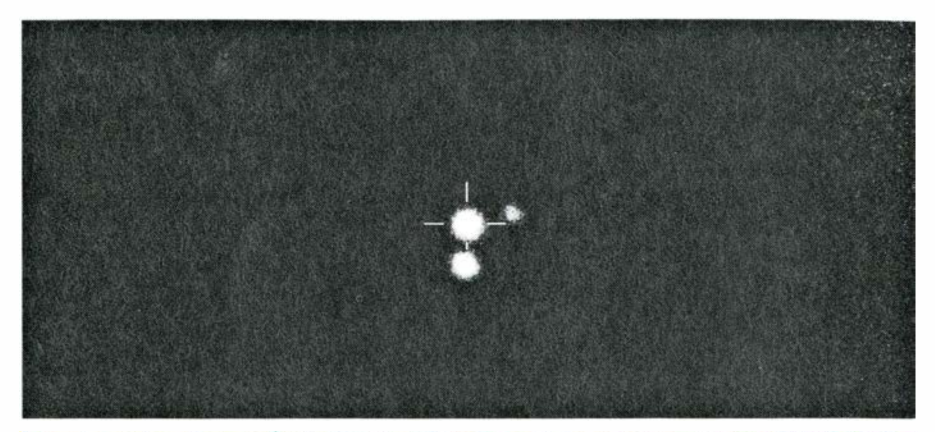


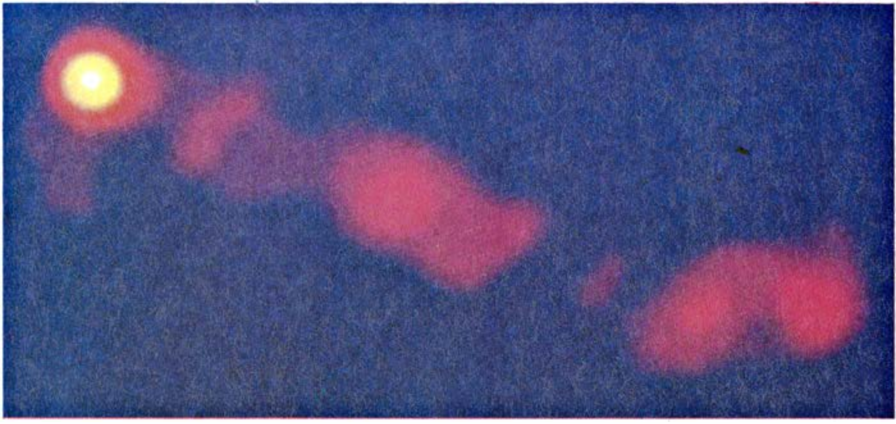
RADIOTELESCOPIO DE CUARENTA METROS del Radioobservatorio de Owens Valley, terminado en 1967, cuyo director es el autor del artículo. A diferencia de los ópticos, un radiotelescopio puede funcionar las 24 horas del día, siempre que las observaciones no se hagan demasiado próximas al Sol. El paraboloide de Owens Valley funciona frecuentemente como parte de un sistema interferométrico que incluye observaciones realizadas en Hat Creek en California, Fort Davis en Texas, North Liberty en Iowa, Algonquin Park en Ontario, Green Bank en Virginia Occidental, el Observatorio Haystack en Massachusetts, el Radioobservatorio de Jodrell Bank en Inglaterra y Effelsberg en Alemania Occidental.

ses en un circuito cerrado la fase de clausura. Estimulados por el artículo de Rogers, Peter N. Wilkinson y el autor, trabajando en el Instituto de Tecnología de California, desarrollaron un método, ahora conocido como cartografía híbrida, para generar imágenes fidedignas basadas en la fase de clausura a partir de observaciones VLBI. Una generalización de este método a un circuito cerrado de cuatro telescopios nos permite extraer un tamaño o amplitud corregidos a partir de cuatro grupos de franjas midiendo lo que se llama amplitud de clausura.

La técnica de clausura aprovecha el propio objeto celeste como referencia de fase y medio de calibrar la amplitud de fase. En el Cal Tech hemos generalizado recientemente el método; pueden así obtenerse buenas imágenes a partir de datos no calibrados en su integridad y, de hecho, no calibrables. Los nuevos métodos no sólo han revolucionado la construcción de imágenes, sino también el proyecto de las distribuciones de radiotelescopios. Además, no están confinados a radioobservaciones, sino que pueden aplicarse a cualesquiera ondas que den lugar a franjas de interferencia detectables.

El advenimiento de las técnicas de clausura posibilitó la elaboración de imágenes detalladas con radiotelescopios sintetizados alejados miles de kilómetros unos de otros. Existe ahora una poderosa razón científica para construir un conjunto de telescopios específicamente proyectados para interferometría de muy larga base. Tras intensivos estudios, nuestro grupo del Cal Tech y otro del Observatorio Nacional de Radioastronomía hemos propuesto la instalación de un conjunto de 10 radiotelescopios de 25 metros de diámetro, que se extendieran desde Hawai y Alaska hasta la costa oriental de los Estados Unidos. Mediante los métodos de cartografía híbrida, esos conjuntos equivaldrían a un radiotelescopio único con una abertura de 7500 kilómetros de diámetro. Hasta la fecha, no se ha proyectado ningún telescopio para interferometría de muy larga base; pero hay telescopios construidos con otros propósitos, y esparcidos alrededor del globo, que pueden servir para someter a prueba la viabilidad del esquema. Las imágenes formadas por tales redes aprovechadas son necesariamente toscas. Para que la interferometría de muy larga base alcance su verdadero potencial, hay que esperar la construcción de la clase de distribución que hemos propuesto.



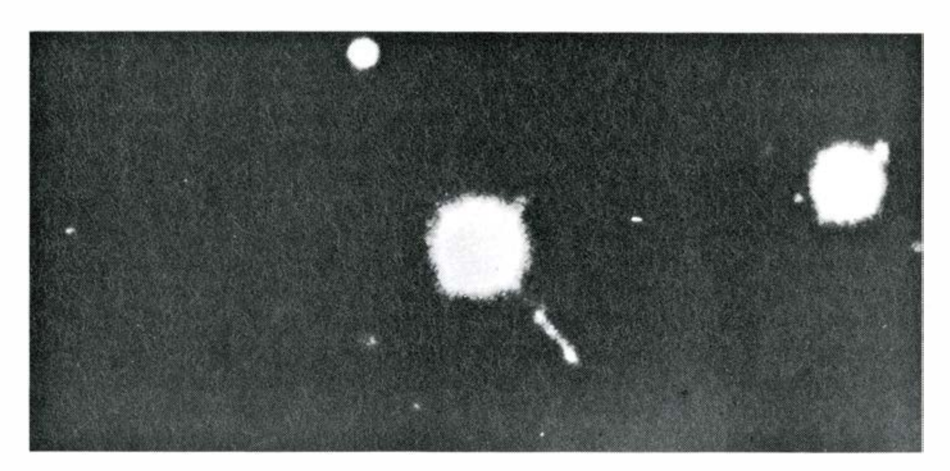


PRIMER QUASAR CARTOGRAFIADO mediante interferometría VLBI. Se trata de 3C 147, que se encuentra a una distancia de siete mil millones de años-luz. En la fotografía de la parte superior, en blanco y negro, hecha con el telescopio de cinco metros del Monte Palomar, el quasar 3C 147 parece una estrella débil típica. En 1976, las señales registradas por los radiotelescopios de Owens Valley y en Hat Creek, Fort Davis, Green Bank y Effelsberg se sintetizaron mediante la nueva técnica de cartografía híbrida para producir una imagen con una resolución de 0,01 segundos de arco (*abajo*). La radioimagen, arbitrariamente coloreada, revela un chorro de 5000 años-luz de longitud que parte de un núcleo brillante. La longitud del chorro es de 0,2 segundos de arco, un quinto del tamaño de la imagen óptica.

La cartografía híbrida se aplicó por primera vez en 1975 a observaciones del quasar 3C 147, una de las muchas radiofuentes "cuasi-estelares" que pueblan los confines extremos del espacio. En fotografías hechas con los mayores telescopios ópticos, los quasars se asemejan a débiles estrellas ordinarias. La primera radioimagen, que tenía una resolución de 0,01 segundo de arco, reveló un objeto con un núcleo brillante y un curioso chorro a un solo lado [véase "Chorros cósmicos", por Roger D. Blandford, Mitchell C. Begelman y Martin J. Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio]. El año siguiente se observó 3C 147 a la resolución más alta de 0,003 segundos de arco con una red de cinco telescopios: dos en California (Owens Valley y Hat Creek), otro en Texas (Fort Davis), uno en Virginia Occidental (Green Bank) y uno en Alemania Federal (Effelsberg, cerca de Bonn). En esa imagen, el chorro se resolvió en una serie de manchas irregulares con una longitud total de 0,2 segundos de arco. En las imágenes ópticas, 3C 147 aparece como un punto único de diámetro un segundo de arco, esto es, cinco veces el tamaño del chorro.

Estos resultados se nos ofrecían doblemente apasionantes. Demostraban, por un lado, la viabilidad técnica de construir buenas imágenes con la totalidad de resolución de la que era capaz la interferometría de muy larga base. Esto significaba que era posible sintetizar un telescopio de dimensiones globales y formar con él imágenes idénticas a las que teóricamente se podrían obtener en ausencia de atmósfera y de errores instrumentales. Pero los propios resultados eran ya sorprendentes y encerraban un mayor interés por sí mismos. La radioestructura en gran escala de los objetos extragalácticos es en general altamente simétrica, constando de dos grandes radiolóbulos que caen a uno y otro lado del objeto óptico. En el núcleo activo de 3C 147, primero de tales núcleos que se cartografió, la estructura resultó ser fuertemente asimétrica: un chorro único dotado de un núcleo brillante en un extremo.

Desde 1976, la cartografía híbrida ha suministrado imágenes fidedignas de



QUASAR 3C 273, primera "radiofuente cuasi-estelar"; fue observado en 1963 por Maarten Schmidt, del Cal Tech. Encontró que la luz emitida por este objeto semejante a una estrella y no resuelto, que coincidía con una potente radiofuente, estaba fuertemente corrida hacia el extremo rojo del espectro, indicando que estaba alejándose de nuestra galaxia a una velocidad aproximada del 16 por ciento de la lumínica. La cartografía VLBI de 3C 273 descubrió una extraña característica [*véase la ilustración siguiente*].

unos 50 quasars y galaxias con núcleos fuertemente energéticos. La estructura asimétrica ha venido a ser una característica común de tales objetos. La mayoría de ellos tienen brillos que varían en escalas de tiempo del orden de un año. Algunos parecen estar dilatándose a velocidades paradójicamente mayores que la de la luz. Tal movimiento "superlumínico" fue puesto de manifiesto, independientemente, por Marshall H. Cohen, del Cal Tech, e Irwin I. Shapiro, del MIT, ya en 1971, fundados en modelos teóricos que ajustaban las amplitudes de las franjas interferométricas. Muchos astrónomos, sin embargo, pusieron en duda la validez de tales modelos.

Aunque los detalles de los modelos puedan haber sido incorrectos, de lo que no cabe duda alguna es de la realidad del movimiento superlumínico. Realidad que se ha puesto de manifiesto de forma convincente a través de la cartografía híbrida de varias fuentes que se sospechaba fuesen superlumínicas. Timothy J. Pearson y sus colegas, del Cal Tech, han estado observando el quasar 3C 273 periódicamente desde 1977 con un sistema VLBI de radiotelescopios en California, Texas, Virginia Occidental, Massachusetts y, en ocasiones, Effelsberg en Alemania. Entre julio de 1977 y julio de 1980, una pequeña mancha expulsada del núcleo brillante del quasar recorrió una distancia de 25 años-luz; de lo que se deduce un movimiento aparente de la misma cifrado en 9,6 veces la velocidad de la luz. (Al calcular la velocidad se ha aplicado al intervalo de tiempo una pequeña corrección cosmológica.)

Se trata sólo de velocidad aparente. La explicación más probable es que la mancha se mueva casi directamente hacia nosotros, a una velocidad del 99,5 por ciento de la celeridad de la luz. Supongamos que nuestro instrumento registra dos brotes de radiación que han sido emitidos por la mancha con un intervalo de tiempo de un año. Los brotes parecerán llegar a nosotros en rápida sucesión, porque el objeto emisor se habrá movido hacia la Tierra casi un año-luz antes de emitir el segundo brote de radiación. En el caso de 3C 273, el segundo brote llegará solamente 3,5 días más tarde que el primero. Si ahora se representase la radioimagen de la mancha en los instantes de las dos observaciones, se hallaría que la mancha se había movido lateralmente en el cielo un trecho equivalente a una décima de año-luz y, por tanto, había viajado aparentemente a una velocidad igual a 10 veces la lumínica. Ello se explica diciendo que el corrimiento lateral representa el lado corto de un triángulo rectángulo muy alargado y delgado cuyo vértice está apuntando fuera de la Tierra. La mancha emitió el primer brote de radiación cuando estaba en el vértice lejano del triángulo; el segundo brote, cuando había viajado realmente 0,995 años-luz a lo largo de la hipotenusa en nuestra dirección.

Se ha encontrado ese movimiento superlumínico en otros dos quasars y una galaxia del tipo conocido como galaxias de Seyfert. Resulta asombroso que estos núcleos activos expulsen burbujas de materia a casi la velocidad de la luz y constantemente en la misma dirección. Vale la pena señalar que, ya en 1967, Martin J. Rees, de Cambridge, había sugerido, apoyado en las rápidas variaciones del brillo de tales objetos, que algunos estaban expulsando materia a velocidades próximas a la de la luz.

El rápido movimiento observado en las fuentes superlumínicas puede encerrar la clave de su estructura asimétrica. Según la teoría especial de la relatividad, si un cuerpo radiante se mueve a velocidades próximas a las de la luz, la radiación queda colimada en un estrecho cono en la dirección del movimiento. Parece probable que los núcleos activos en esas raras fuentes celestes estén en realidad expulsando dos chorros en direcciones opuestas. Sólo podemos observar el haz dirigido hacia nosotros; la radiación del que avanza en sentido opuesto nos es invisible. Una idea sugestiva, sin duda, pues sirve para reconciliar la simetría en gran escala observada en muchos objetos extragalácticos con la asimetría en pequeña escala observada en muchos núcleos. En el punto donde los chorros se abren paso en el medio intergaláctico y son retardados, la radiación ya no queda colimada, sino que se propaga en todas las direcciones, y se observan las dos grandes manchas.

¿Cuál es la naturaleza de la fuente de energía en quasars y radiogalaxias? ¿De qué tipo es la materia que expulsan? He aquí dos cuestiones fundamentales que tiene planteadas la astronomía. Las observaciones VLBI proporcionan el único medio de contemplar directamente la estructura de los núcleos galácticos. Cuando los mapas híbridos de quasars y radiogalaxias se combinan con observaciones de radio y ópticas de resolución más baja, suministran datos importantes sobre la máquina central que hace funcionar esos objetos dinámicos. Un ejemplo particularmente valioso es el de la galaxia NGC 6251.

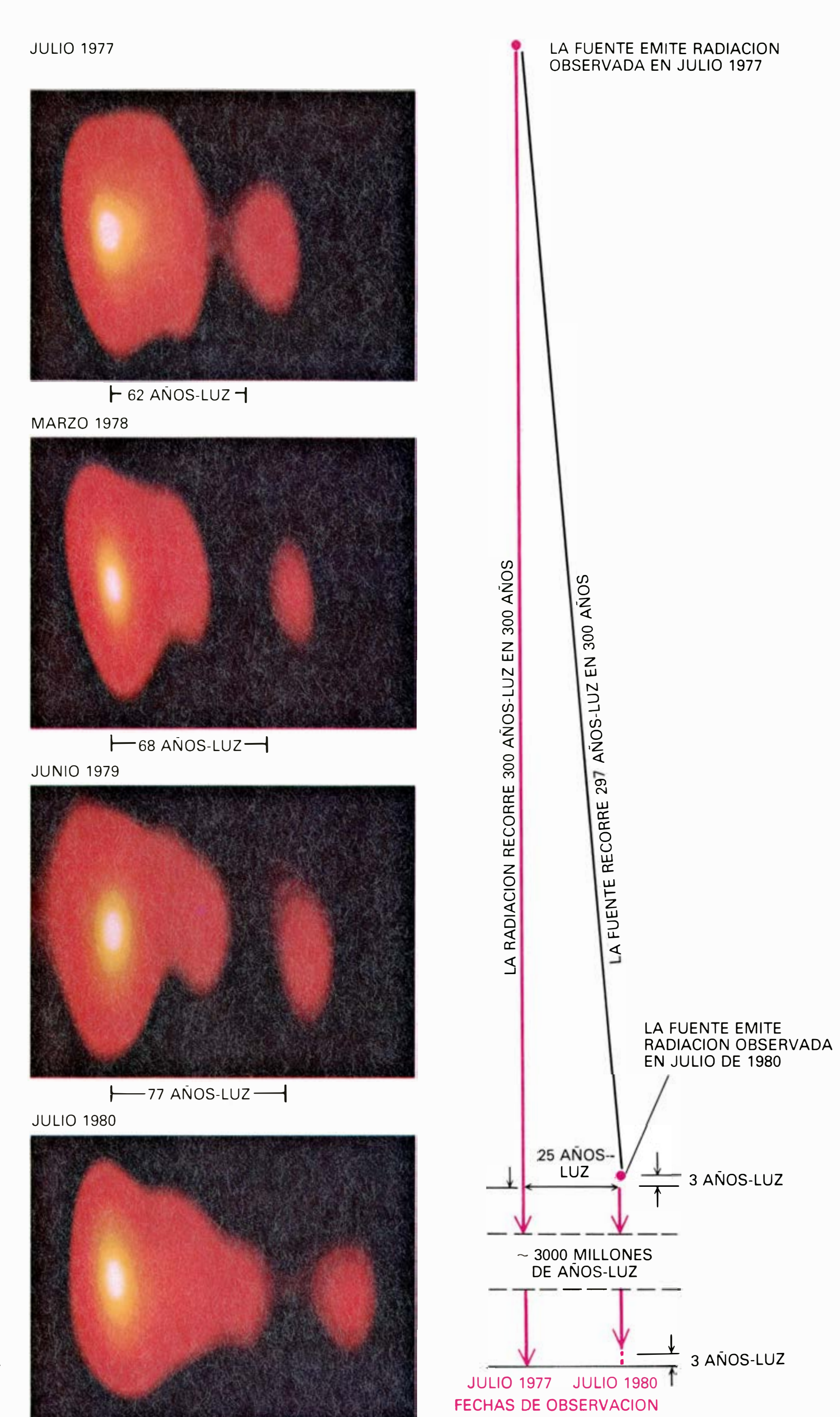
NGC 6251 es una galaxia elíptica, en un pequeño cúmulo de ellas, a 400 millones de años-luz de distancia. A las longitudes de onda de la luz visible, diríase que se trata de una galaxia completamente normal, sin nada que la distinga de millones de otros objetos semejantes. Pero sus extraordinarias propiedades se nos revelaron, por primera vez, a raíz de las observaciones a longitudes de onda de radio. La ilustración de la página 26 muestra tres radioimágenes de NGC 6251 a tres resoluciones diferentes hechas con tres radiotelescopios distintos. Las tres imágenes en color tienen escalas que difieren en un factor de más de dos millones. Peter C. Waggett, Peter J. Warner y John E. Baldwin obtuvieron la imagen superior con el radiointerferómetro de 800 metros de Cambridge y la imagen del centro con el interferómetro de cinco kiló-

metros. La imagen inferior fue tomada por Cohen, Roger D. Blandford y el autor con tres telescopios en una campaña de observación VLBI: uno en California (Owens Valley), otro en Virginia Occidental (Green Bank) y otro en Massachusetts (el Observatorio Haystack).

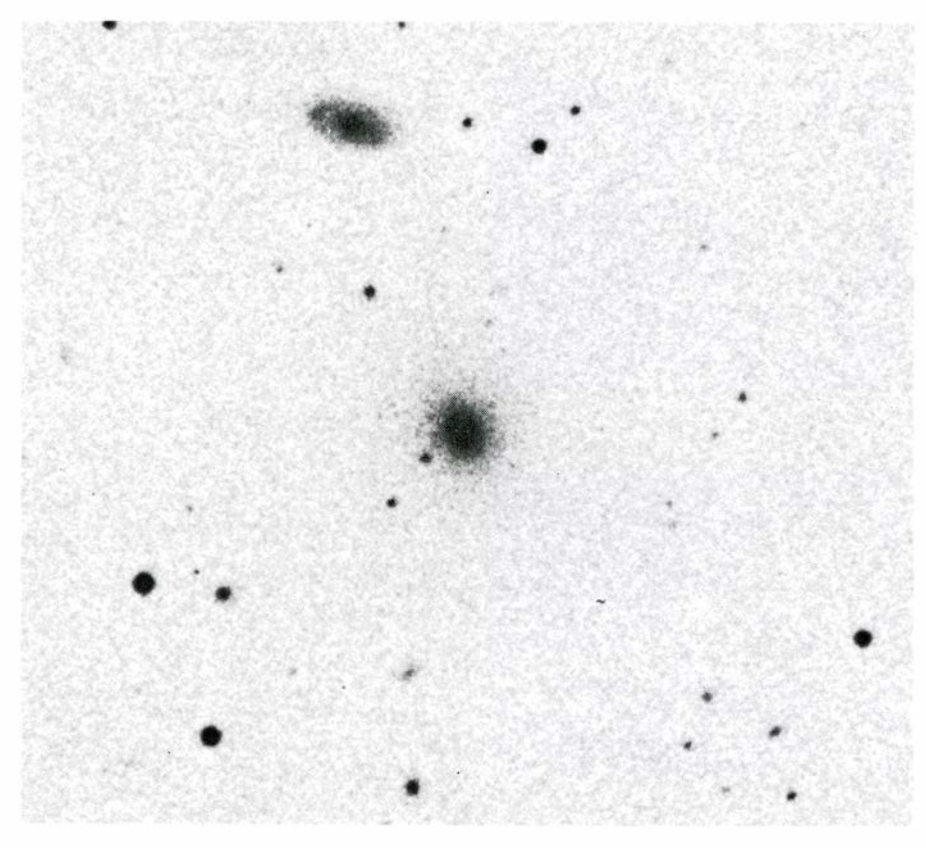
La imagen superior muestra la radioestructura general de NGC 6251, que se extiende a lo largo de seis millones de años-luz, unas 60 veces el diámetro de una galaxia grande. Nos hallamos, pues, ante uno de los mayores objetos que se conocen. La posición de NGC 6251, tal como se registra en la fotografía óptica, está marcada con una cruz. En la escala de la reproducción, la imagen óptica tendría menos de dos milímetros de diámetro. Desde la posición óptica, el radiomapa muestra un puente que se extiende hacia la derecha, o noroeste. La imagen intermedia representa un primer plano del puente, que revela un notable chorro recto de más de 500.000 años-luz de longitud, unas cinco veces el diámetro de nuestra galaxia. El brillante núcleo en el extremo oriental del chorro coincide con el núcleo de NGC 6251.

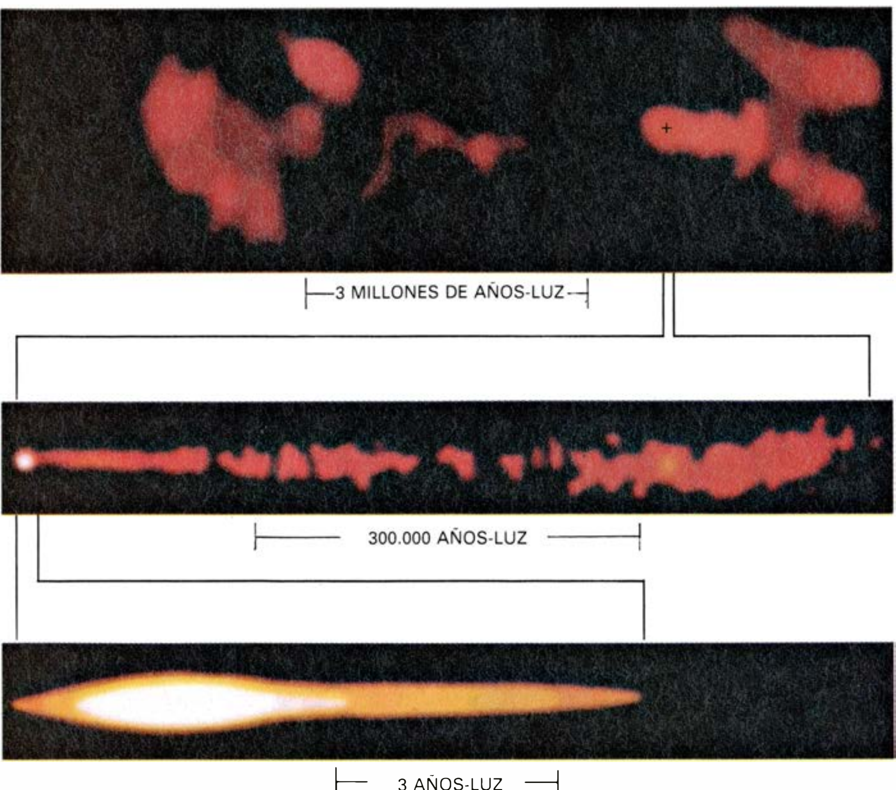
La imagen inferior muestra el núcleo aumentado en un factor de cerca de 100.000. El núcleo es también un chorro de escasamente ocho años-luz de longitud, que está alineado con el chorro grande dentro de unos pocos grados. La anchura angular del chorro nuclear es aproximadamente 0,0001 segundos de arco, equivalente a la anchura de un cabello humano observado desde una distancia de 80 kilómetros. El alineamiento de los dos chorros debe haber persistido durante más de 500 millones de años, que es el tiempo que la materia que se moviera a velocidad cercana a la luz tardaría en llegar desde el núcleo hasta el extremo del chorro grande.

Las radiopropiedades de NGC 6251 imponen grandes exigencias al motor central responsable de la actividad observada. En primer lugar, el motor central debe producir una enorme cantidad de energía, equivalente a la conversión total de la masa de 10 millones de soles en energía, en una región de diámetro muy inferior a un año-luz. En segundo lugar, ha de colimar la materia expulsada en un cono de sólo tres grados de anchura. Tercero, permanecerá estable y mantendrá el chorro estable dentro de aproximadamente un grado, al tiempo que expulsa una cantidad de masa igual a la masa de una pequeña galaxia. Por último, tendrá que expulsar la ma-



SERIE DE RADIOIMAGENES DE 3C 273 con una resolución de 0,001 segundos de arco (*izquierda*) obtenidas mediante síntesis de señales registradas por diversas combinaciones de cuatro o cinco radiotelescopios en California, Texas, Massachusetts, Virgina Occidental y Alemania Occidental. En un período de tres años, entre julio de 1977 y julio de 1980, una mancha expulsada del quasar parece haber recorrido 25 años-luz, lo que significa una velocidad "superlumínica" aparente de 9,6 veces la velocidad de la luz (tras haber aplicado al intervalo de tiempo una pequeña corrección cosmológica). La velocidad "prohibida" no es más que una ilusión creada por el hecho de que la mancha se está moviendo casi directamente hacia nosotros a una velocidad de más del 99 por ciento de la lumínica. Como se muestra en el diagrama esquemático de la derecha, la radiación procedente de la mancha que llegó a los radiotelescopios en julio de 1980 se había emitido 300 años después que la radiación registrada en julio de 1977. Sin embargo, en ese lapso la mancha se había movido hasta un punto 297 años-luz más cercano a la Tierra. Así, las dos emisiones llegaron a la Tierra con sólo tres años de diferencia. En el mismo período, la mancha se había movido lateralmente 25 años-luz (el lado corto de un estrecho triángulo rectángulo). La distancia entre el núcleo y la mancha en la radioimagen es de 0,006 segundos de arco: 1/150 de la imagen óptica.





CHORROS EN LA GALAXIA NGC 6251, galaxia elíptica distante 400 millones de años-luz, revelados en una serie de radioimágenes hechas con resolución creciente. En una imagen óptica (*arriba*) tomada con el telescopio de 5 metros de Monte Palomar, NGC 6251 parece una galaxia elíptica sin nada de especial. Pero se trata de una intensa radiofuente. La superior de las tres radioimágenes fue realizada con el radiointerferómetro de 800 metros de Cambridge por Peter C. Waggett, Peter J. Warner y John E. Baldwin. La posición óptica de NGC 6251 está marcada por una pequeña cruz. La imagen del centro, obtenida por los mismos investigadores mediante el telescopio de 8 kilómetros en Cambridge, presenta un chorro de más de 500.000 años-luz de longitud con el núcleo galáctico en el extremo oriental (*izquierda*). La imagen inferior revela un intenso chorro que mide ocho años-luz de longitud y parte del núcleo. El chorro tiene una anchura de 0,0001 segundos de arco. Sacaron la imagen Marshall H. Cohen, Roger Blandford y el autor con la ayuda de los radiotelescopios de Owens Valley, Green Bank y Haystack.

teria a una velocidad próxima a la de la luz si es la misma clase de motor que el responsable de las fuentes superlumínicas.

Sólo sabemos de una clase de objeto capaz de satisfacer todos esos requisitos: un agujero negro supermasivo en rotación. El objeto habría de tener la masa de unos 1000 millones de soles y debería estar girando de manera tal que el efecto giroscópico lo mantuviera estable. El casi perfecto y persistente alineamiento de los chorros se puede explicar si se supone que son proyectados a lo largo del eje de rotación del agujero negro. Hay indicaciones adicionales de que en el núcleo de NGC 6251 puede haber un objeto supermasivo, suministradas por observaciones ópticas realizadas recientemente por Wallace W. L. Sargent, Peter J. Young y sus colaboradores en el Cal Tech. Con la técnica llamada interferometría de moteado, han hallado una intensa aguja de radiación en el segundo de arco central del núcleo. Deducen que en esta región se concentraría una masa de mil millones de masas solares de materia.

Si el motor del núcleo de NGC 6251 es realmente un agujero negro, su potencia procedería de la liberación de energía gravitatoria, no de la energía nuclear que hace brillar a las estrellas. Los requisitos de masa quedarían por tanto divididos por aproximadamente 50. La expulsión de materia a alta presión y a casi la velocidad de la luz se realizaría con la máxima facilidad en el pozo profundo de potencial que rodea al agujero negro, hacia donde corre atraída la materia próxima a velocidades rayanas en la lumínica. Un agujero negro en rotación de mil millones de masas solares explicaría por tanto de manera plausible y económica las propiedades observadas de este notable objeto.

Si esta conclusión es correcta, y si en efecto hay agujeros negros supermasivos en el núcleo de las galaxias, ¿podremos llegar observacionalmente a comprobar su existencia? Llevando las observaciones VLBI a frecuencias más altas, se mejorará la resolución alcanzada hasta ahora en diez veces. A tamaña resolución, considerablemente superior a 0,0001 segundos de arco, debe poderse cartografiar la estructura de NGC 6251 y otras galaxas activas a una escala no mucho mayor que el tamaño del propio agujero negro. Quizás entonces se dilucidará si el objeto central es realmente un agujero negro u otro objeto de clase enteramente nueva.

Calmodulina

Entre los mensajeros intracelulares, los iones de calcio ocupan un puesto destacado. Su mensaje suele transmitirlo, con asidua frecuencia, la calmodulina, proteína omnipresente a la que se unen los iones cálcicos

Wai Yiu Cheung

Para que un organismo desarrolle sus funciones debe existir comunicación entre sus células. La pueden lograr por contacto directo o a través de señales transmitidas por un impulso nervioso o por un mensajero químico. A su vez, las células están divididas en varios compartimientos y poseen orgánulos subcelulares; todos ellos necesitan también estar en comunicación. Cualquier señal precisa de un receptor. El receptor de un mensaje químico es típicamente una proteína, que acusa la llegada del mensajero e interpreta el mensaje mediante la regulación de la actividad celular apropiada. Quizá sea el ion cálcico el mensajero intracelular más versátil. Su principal receptor es una proteína omnipresente que se denomina calmodulina y que parece mediar y modular la mayoría de las múltiples actividades del ion.

Se comenzó a apreciar la importancia del ion cálcico como regulador celular en 1883, cuando el fisiólogo británico Sydney Ringer descubrió que sólo podía mantenerse la contracción muscular de un corazón de rana aislado, si en el medio que bañaba al órgano había iones de calcio. Posteriormente demostraría que el calcio era imprescindible en otras actividades fisiológicas. En los años 50, L. V. Heilbrunn, de la Universidad de Pennsylvania, demostró que la inyección del ion en la fibra muscular provocaba su contracción. Desde entonces se ha probado que el ion cálcico interviene en la mayoría de los procesos de la fisiología celular. (Bajo condiciones fisiológicas, la forma activa es la del ion Ca^{++}, porque en el medio acuoso interno el átomo de calcio pierde dos electrones y se convierte en un ion divalente: un ion con dos unidades de carga eléctrica positiva.)

He aludido al papel del calcio en la contracción muscular. Pero también es mediador de la endocitosis y la exocitosis (toma y salida de sustancias a través de la membrana celular), de la motilidad celular, del movimiento de los cromosomas previo a la división celular y quizá del propio proceso de la división. Desempeña un papel central en el metabolismo del glucógeno, que es una forma de almacenamiento de la glucosa. Influye en la síntesis y liberación de los neurotransmisores, moléculas que llevan una señal de una neurona a otra. A pesar de esas múltiples y sobresalientes funciones del calcio, ignorábamos su mecanismo de acción hasta hace muy poco.

La primera indicación sobre el modo de la acción del ion a nivel molecular se obtuvo en los años 50, a raíz de las investigaciones realizadas sobre la contracción muscular. Se descubrió entonces que en los músculos esquelético y cardíaco (que se denominan músculo estriado debido a su apariencia en las micrografías) el calcio se unía a una proteína llamada troponina *c*. No se sabía aún cómo provocaba el calcio la contracción del músculo liso (la mayor parte del músculo involuntario) ni los movimientos contráctiles de las células no musculares; tampoco cómo actuaba en otros tejidos. Las respuestas a esas cuestiones han sido precisamente las que condujeron a la calmodulina. Revisaremos primero la historia del descubrimiento de la calmodulina y luego abordaremos su estructura y función, de muy diversa índole esta última.

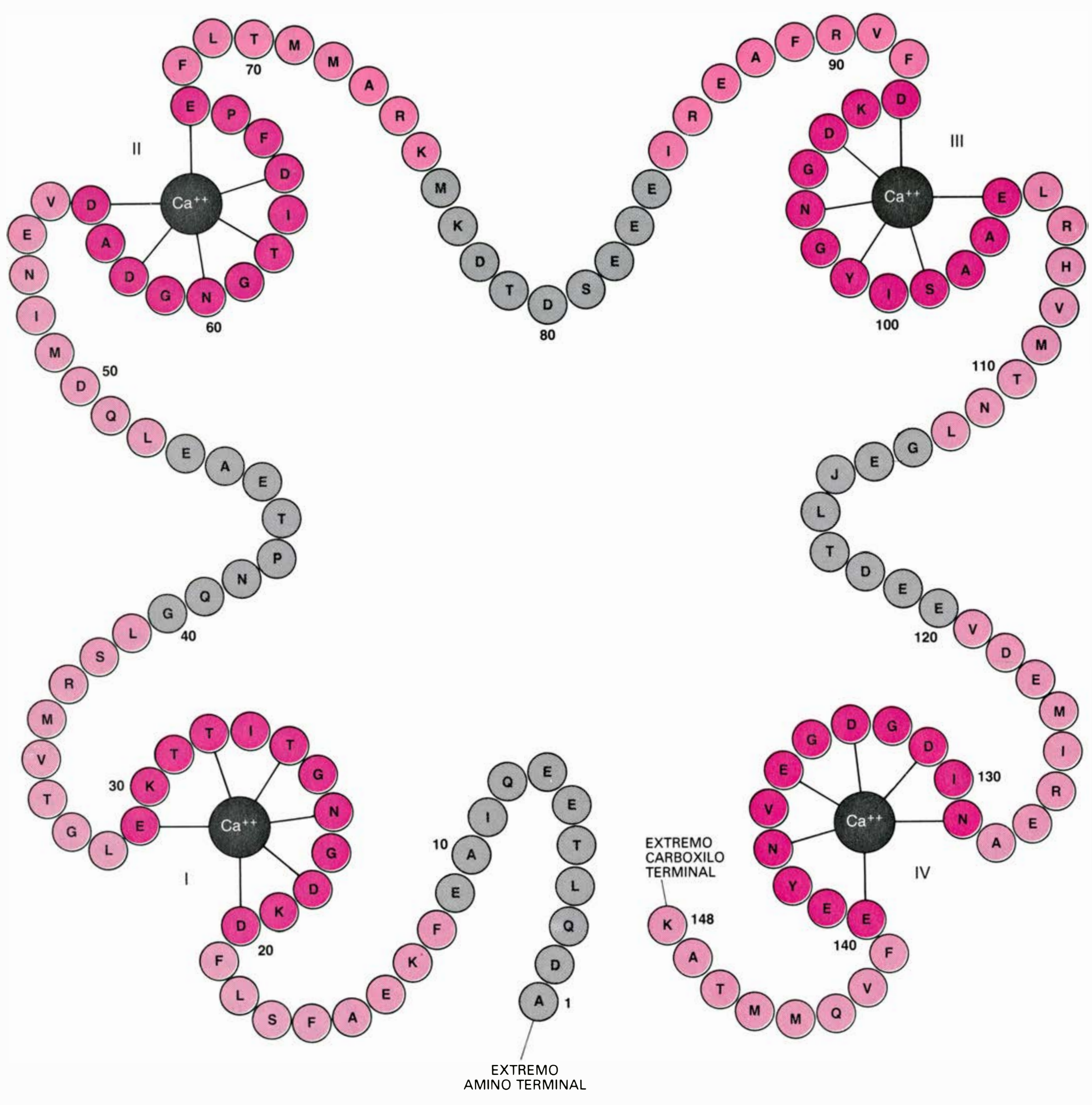
A finales de los años 50, Earl W. Sutherland Jr., de la Facultad de Medicina de la Western Reserve University, descubrió el mecanismo por el cual las células reciben las señales que les proporcionan las hormonas, y que ponen en marcha las funciones celulares. En su caso, la hormona era el glucagón, las células eran las del hígado y la función consistía en la degradación de glucógeno almacenado, para proporcionar glucosa al cuerpo bajo stress. Sutherland descubrió que la unión del glucagón con un receptor situado sobre la membrana celular externa activaba un enzima, ciclasa de adenilato, que se hallaba inserta en la membrana, atravesándola de parte a parte. La ciclasa convierte adenosín trifosfato (ATP) del citoplasma celular en el nucleótido especializado adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico). El AMP cíclico actúa de mensajero intracelular que retransmite el mensaje hormonal a la maquinaria bioquímica de la célula, incitándola a degradar glucógeno. Pronto se probó que el AMP cíclico operaba como mensajero intraceluar en una gran variedad de células, que respondían a diversas hormonas.

En 1964, siendo yo becario postdoctoral de la Fundación Johnson para la Investigación, adscrita a la Universidad de Pennsylvania, estudiaba las variaciones de la concentración intracelular de AMP cíclico. Me interesaban las propiedades reguladoras del enzima fosfodiesterasa, que degrada el AMP cíclico a 5'-adenosín monofosfato, eliminando así la señal. Con la intención de purificar fosfodiesterasa de cerebro bovino (una fuente rica en el enzima) pasé un extracto sin purificar por una columna de cromatografía de canje iónico. La resina de una columna de ese tipo, que tiene carga negativa, retiene con más o menos intensidad los diferentes componentes del extracto. Al verter luego una disolución apropiada a través de la columna, las fracciones sucesivas que se eluyen contienen el componente que se busca en distintas concentraciones. Si el componente de interés es un enzima, cabe esperar que las fracciones con mayor concentración muestren más actividad enzimática que las otras.

Con gran sorpresa encontré que la fosfodiesterasa parcialmente purificada presentaba bastante menos actividad que el extracto cerebral sin purificar. Repetí el procedimiento de canje ióni-

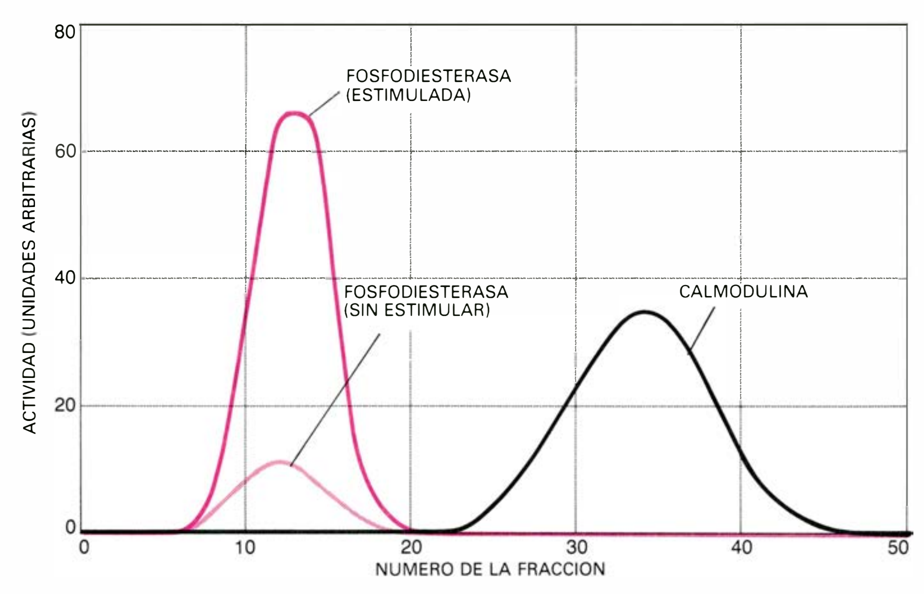
co y los ensayos de actividad enzimática y no pude descubrir ningún error. Una peculiaridad del ensayo condujo a la resolución del enigma y al descubrimiento de la calmodulina. El ensayo comprendía dos etapas; primero se trataba el AMP cíclico con fosfodiesterasa, obteniéndose 5'-adenosín monofosfato; éste se trataba entonces con veneno de serpiente, lo que rendía adenosina y fosfato. Finalmente se medía la cantidad de fosfato para estimar la actividad de la fosfodiesterasa.

Por lo que se sabía de ensayos anteriores, los resultados debían ser los mismos caso de seguir el proceso en dos etapas o de realizar el experimento en una sola, mezclando veneno de serpiente con fosfodiesterasa. Mi perplejidad ante la pérdida de la actividad fosfodiesterasa me hizo repetir cuidadosamente el ensayo, realizándolo en una y en dos etapas. Con el extracto cerebral sin purificar no se apreciaba dife-



A ALANINA
D ASPARTATO
E GLUTAMATO
F FENILALANINA
G GLICINA
H HISTIDINA
I ISOLEUCINA
J TRIMETIL LISINA
K LISINA
L LEUCINA
M METIONINA
N ASPARAGINA
P PROLINA
Q GLUTAMINA
R ARGININA
S SERINA
T TREONINA
V VALINA
Y TIROSINA

MOLECULA DE LA CALMODULINA, que media en muchas de las funciones de los iones de calcio. Consta de una sola cadena de proteína con 148 residuos de aminoácidos. La molécula posee cuatro dominios muy similares, dotado cada uno de un centro de unión para un ion cálcico (Ca^{++}). El diagrama esquemático de la molécula subraya la posible estructura de los cuatro centros de unión, propuesta por Robert H. Kretsinger, de la Universidad de Virginia. Kretsinger basó su modelo estructural en un estudio, por cristalografía de rayos X, de la parvalbúmina, una proteína con centros de unión para calcio que tiene una secuencia de aminoácidos estrechamente emparentada con la de la calmodulina. Los centros de unión son bucles (*color oscuro*) flanqueados por una región en hélice (*color claro*). Se cree que cada ion cálcico se une a seis aminoácidos. El diagrama muestra la secuencia de aminoácidos de la calmodulina de cerebro de bovino, establecida por Thomas C. Vanaman, del Hospital Clínico de la Universidad de Duke.



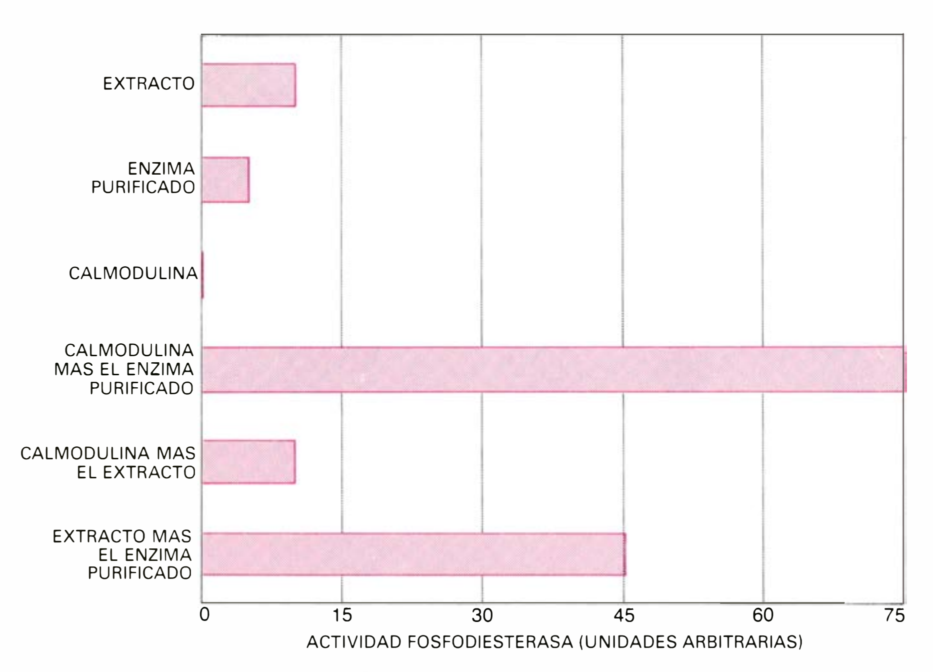
PURIFICACION del enzima fosfodiesterasa a partir de un extracto de tejido cerebral bovino, que provoca la separación de la calmodulina y el enzima y, en consecuencia, reduce la actividad del enzima. Se pasa el extracto por una columna de intercambio iónico. Las proteínas que se han adsorbido a la resina de la columna se eluyen (arrastran) más o menos deprisa, dependiendo de su carga eléctrica. Las proteínas eluidas se recogen en fracciones sucesivas, y se miden las respectivas actividades. Las curvas muestran la actividad de fosfodiesterasa (*color*) y la actividad de la calmodulina (*negro*). El enzima purificado no estimulado por calmodulina tiene baja actividad. Cuando se añade calmodulina o veneno de serpiente (un reactivo del ensayo para la fosfodiesterasa) a las fracciones de fosfodiesterasa, se estimula el enzima.

rencia; ambos procedimientos indicaban el mismo nivel de actividad. Sin embargo, en el caso del enzima purificado sí se apreció una diferencia: el ensayo en una sola etapa reveló una actividad significativamente mayor. El ensayo en dos etapas mostraba una pérdida de actividad porque no había veneno de serpiente durante la reacción de la fosfodiesterasa. Cuando lo añadí al enzima purificado, la actividad fosfodiesterasa aumentó. En cambio, no se produjo efecto al añadir veneno al extracto sin purificar.

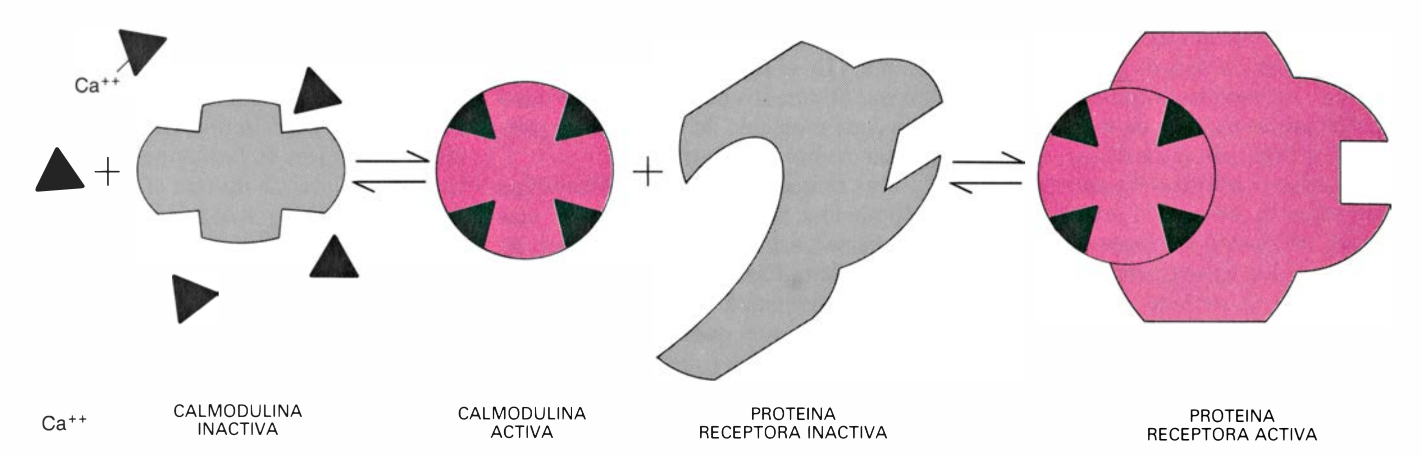
Una posible explicación del fenómeno habría que buscarla en la presencia de un factor activante en los extractos sin purificar, que se eliminaría durante la purificación; el veneno de serpiente compensaría, de alguna forma, la ausencia del factor. En 1967 (me encontraba entonces en el St. Jude Children's Research Hospital de Memphis) disponía de pruebas suficientes para asegurar que una de las fracciones cromatográficas contenía efectivamente un factor requerido para la actividad de la fosfodiesterasa. Aunque el factor era una proteína, desde luego no se trataba de la fosfodiesterasa. La adición de la proteína al enzima purificado e inactivo regeneraba la actividad enzimática, pero su adición al extracto cerebral sin purificar, donde presumiblemente ya debía encontrarse, no producía aumento de la actividad. Otros investigadores, particularmente Shiro Kakiuchi, de la Universidad de Osaka, no tardaron en confirmar que la fosfodiesterasa de cerebro bovino sólo era totalmente activa en presencia de un activador proteínico separable del enzima.

Se trataba de la calmodulina, aunque el nombre lo recibiera mucho después, cuando estuvo bien probada su conexión con el calcio. Poco se sabía de la proteína al principio; tan sólo que no tenía actividad enzimática propia, que era notablemente estable cuando se la calentaba y que interactuaba con la fosfodiesterasa estequiométricamente (en proporciones específicas) y no de forma catalítica (como un enzima). En nuestro laboratorio, y en otros, se desarrollaron métodos para purificar la proteína y para caracterizarla bioquímicamente. En 1973, Jerry H. Wang, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Manitoba, descubrió que el calcio se unía a la calmodulina. Esto explicaba ciertas observaciones anteriores. Kakiuchi había señalado ya que la fosfodiesterasa cerebral requería iones cálcicos para alcanzar su máxima actividad y que la calmodulina incrementaba la respuesta del enzima a la presencia de calcio. Por mi parte, había observado que una pequeña cantidad de calcio permanecía asociada a una fosfodiesterasa parcialmente purificada que conservaba algo de calmodulina. Pronto se aclaró la conexión entre calcio y calmodulina. Esta mediaba en el efecto del calcio sobre la fosfodiesterasa; el ion activaba la calmodulina que, a su vez, activaba la fosfodiesterasa.

Numerosos laboratorios emprendieron el estudio de la calmodulina y no se tardó mucho en caracterizar la proteína en detalle. Consta de una úni-



LA ACTIVIDAD DE LA FOSFODIESTERASA se reconstituye con calmodulina. La fosfodiesterasa purificada en la columna cromatográfica posee menos actividad que el extracto cerebral sin purificar. La fracción de la calmodulina no muestra actividad fosfodiesterasa. La adición de calmodulina al enzima purificado aumenta notablemente la actividad enzimática. La adición de calmodulina al extracto cerebral no produce efecto, pues el extracto contiene suficiente calmodulina para estimular el enzima. La presencia de suficiente calmodulina en el extracto se confirma mezclando el extracto con fosfodiesterasa purificada. La mezcla muestra más actividad que la suma de las actividades determinadas por separado.



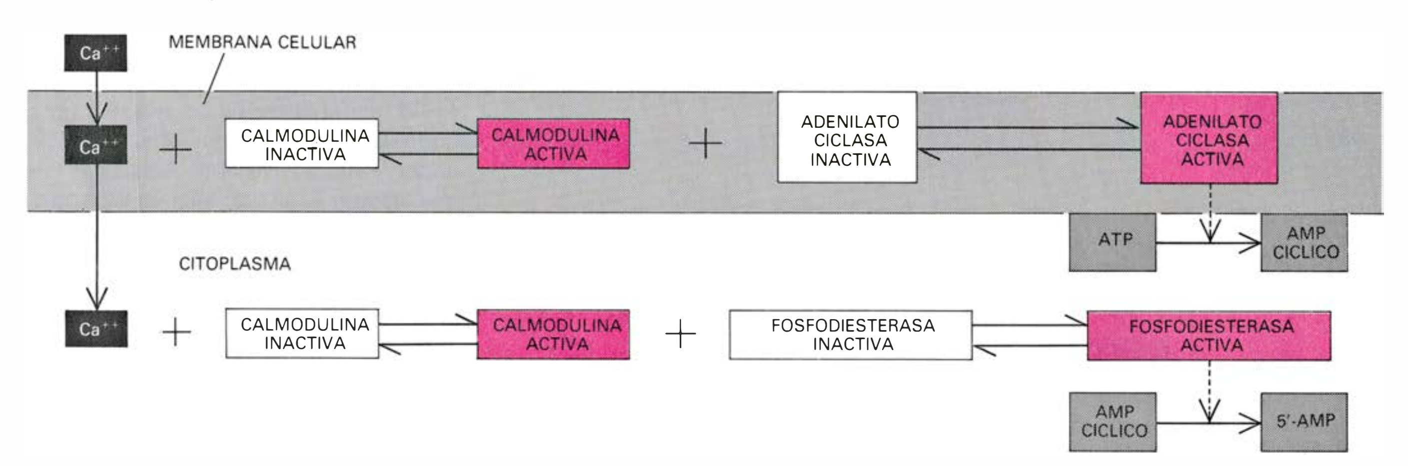
MECANISMO DE MEDIACION de la calmodulina en la acción biológica de los iones cálcicos. El diagrama se ha simplificado notablemente. Ni el ion cálcico ni la calmodulina son activos por separado. La unión de cuatro iones cálcicos a la calmodulina cambia la conformación de la proteína y la activa. La calmodulina activada puede entonces interactuar con un enzima (o alguna otra proteína). La interacción altera la conformación del enzima y lo activa. Probablemente un factor importante del proceso lo constituya la flexibilidad de la molécula de calmodulina. Los dibujos del artículo son de Alan D. Iselin.

ca cadena de 148 residuos de aminoácidos, con un peso molecular de 16.700. Un tercio de los residuos son de glutamato o aspartato, aminoácidos que cuentan con cadenas laterales que aportan grupos carboxilato con carga negativa (COO^-). Son estos grupos los que se unen principalmente al ion cálcico. La proteína parece plegada en cuatro dominios, que coinciden entre sí en primera aproximación, cada uno de los cuales posee un centro de unión para calcio. La afinidad de los centros por el calcio es tal, que depende de la concentración del ion en el ambiente intracelular el que el calcio se una o no a la proteína. Una afinidad de ese orden es una propiedad esencial para un receptor de señales.

La calmodulina es una proteína notablemente robusta. Resiste valores de *p*H muy bajos (ácidos) y agua hirviendo, condiciones éstas en que la mayoría de las proteínas quedan inactivadas. En el interior de las células se encuentra calmodulina libre en el citoplasma o asociada a membranas u orgánulos. Su concentración en el estado estacionario varía según el tipo de célula y las condiciones. Lo importante es que su concentración no parece limitar la velocidad de las reacciones enzimáticas. En otras palabras, parece haber siempre más que suficiente calmodulina.

Además de su alta proporción de glutamato y aspartato, destaca la calmodulina porque carece de dos aminoácidos fácilmente oxidables (y por ello fácilmente degradables): triptófano y cisteína. La falta de cisteína (que contiene un átomo de azufre) supone la imposibilidad de establecer puentes disulfuro entre distintos tramos de la cadena. La ausencia de tales puentes, junto con la falta de hidroxiprolina (un aminoácido modificado que con frecuencia refuerza los giros de la cadena proteínica) hacen de la calmodulina una molécula muy flexible. Es probable que su capacidad para recobrar la configuración normal, después de haber sido alterada por condiciones extremas, contribuya a su estabilidad. Quizás en esa flexibilidad resida la clave del modo de acción de la calmodulina, como explicaré más adelante.

La versatilidad de la calmodulina corre pareja con la de su compañero, el calcio. El ion abunda en todos los sistemas biológicos. Su valor como señal deriva en parte de que la concentración del ion en el fluido extracelular es entre 1000 y 10.000 veces más alta que en el interior de la célula. De hecho, la célula no puede tolerar un nivel de calcio elevado, porque éste se combina con fosfatos orgánicos esenciales, como el ATP, a los que secuestra en forma de sales insolubles. El empinado gradiente entre las concentraciones extracelular e intracelular se mantiene gracias a la membrana celular, que generalmente

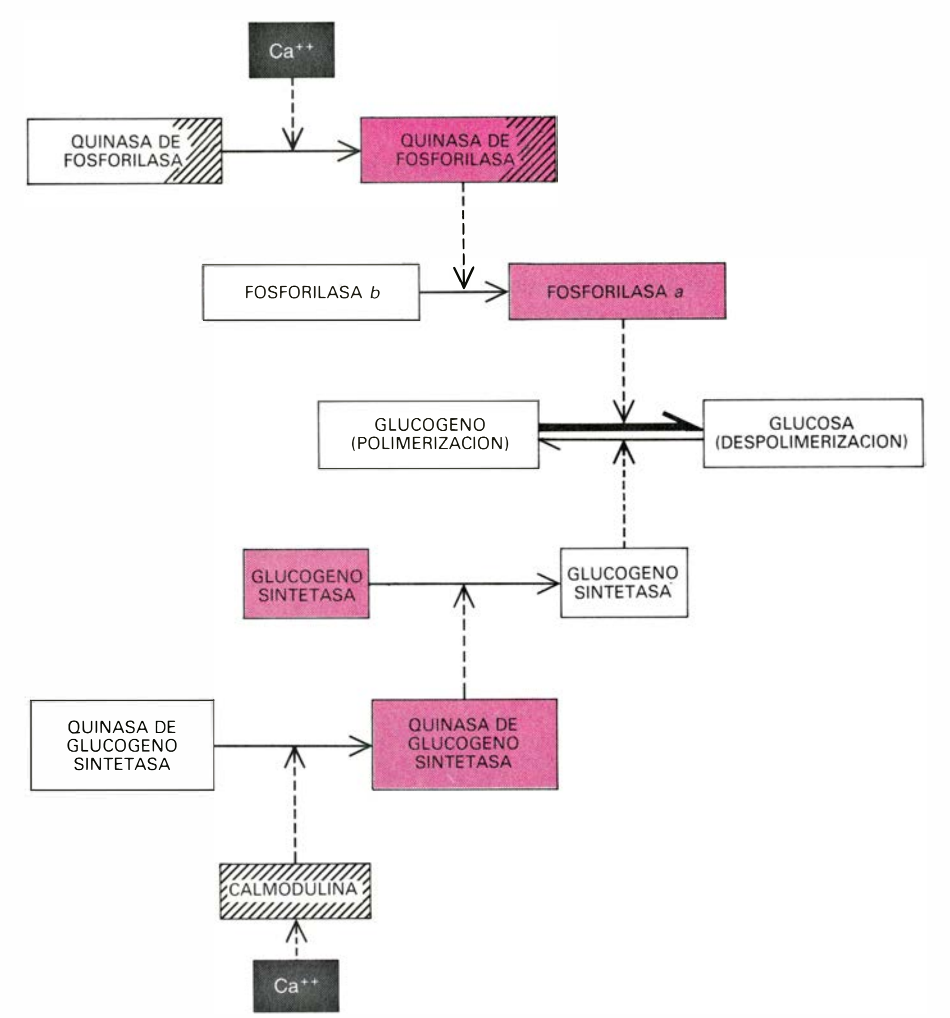


ESQUEMA VEROSIMIL DE LA ACTIVACION SECUENCIAL de los enzimas adenilato ciclasa y fosfodiesterasa en el cerebro (y quizás en algunos otros tejidos.) Cuando la llegada de un impulso nervioso permeabiliza la membrana exterior de la célula al calcio, los iones penetran en la membrana. Activan la calmodulina de la membrana, que a su vez activa la adenilato ciclasa, enzima que cataliza la conversión de adenosín trifosfato (ATP) en el mensajero intracelular adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico). Después de cumplir en la célula alguna misión como mensajero, la fosfodiesterasa degrada al AMP cíclico en 5'-adenosín monofosfato (5'-AMP). La calmodulina activa tanto el enzima degradativo como el enzima de síntesis, la adenilato ciclasa. Se cree que los iones cálcicos, después de difundir a través de la membrana, se unen a la calmodulina citoplasmática, y ésta activa la fosfodiesterasa.

es impermeable al ion, y a mecanismos que eliminan el exceso de calcio. Una bomba enzimática situada sobre la membrana lo expulsa de la célula, o lo capta un orgánulo intracelular. Cuando un impulso nervioso o alguna otra señal estimulan la célula, la membrana se vuelve momentáneamente permeable al calcio. La consiguiente entrada de ion cálcico se detecta como un mensaje.

Podemos describir ya con cierto detalle el mecanismo por el cual el ion cálcico regula enzimas como la fosfodiesterasa dependiente del calcio. El proceso comprende dos activaciones sucesivas. Sin calmodulina, la fosfodiesterasa es prácticamente inactiva, lo mismo que la calmodulina sin calcio. Cuando la entrada de iones cálcicos eleva su concentración en la célula por encima de cierto umbral, se unen cuatro iones con cada molécula de calmodulina. (En el caso de algunos otros enzimas, el número de iones que se unen con cada molécula de calmodulina puede ser menor de cuatro.)

Tras unirse al calcio, la calmodulina adopta una conformación nueva, más compacta; así se activará. Daniel R. Storm, de la Facultad de Farmacología de la Universidad de Washington, ha descubierto que queda expuesta una región hidrofóbica (que repele el agua) de la molécula y, aparentemente, a través de esa región se produce la interacción con la fosfodiesterasa (u otro enzima). El enzima, por su parte, adopta una nueva conformación, al tiempo que se estimula su actividad catalítica. Cualquier exceso de calcio que entre, se bombea fuera de la célula o lo captan sus orgánulos. Las dos reacciones de activación son reversibles. Acabada la estimulación de la célula, la concentración de ion cálcico desciende a su nivel de régimen o de estado estacionario. La molécula de calmodulina suelta sus iones y recupera su conformación inactiva, con lo que se disocia el complejo de calmodulina y fosfodiesterasa. De ese modo se inactiva el enzima y finaliza la reacción iniciada por el calcio.



METABOLISMO DEL GLUCOGENO en el músculo esquelético. Está regulado por los iones de calcio, que se unen a la molécula de calmodulina (*rayada*), una subunidad del enzima quinasa de fosforilasa. La quinasa activa (*color*) transfiere grupos fosfato al enzima inactivo fosforilasa *b*, convirtiéndolo en su forma activa, fosforilasa *a*. La fosforilasa activa inicia la degradación del glucógeno, un polímero de la glucosa, proporcionando moléculas de glucosa para producir la energía que necesita la contracción muscular. Al mismo tiempo se detiene la polimerización de la glucosa. Los iones de calcio se unen a la calmodulina, que activa el enzima quinasa de sintetasa de glucógeno. La quinasa transfiere grupos fosfato a la sintetasa de glucógeno. En este caso, la fosforilación inactiva el enzima, que de otro modo iniciaría la polimerización de la glucosa, impidiendo que pudiera disponerse del azúcar como fuente de energía.

Se ha hallado calmodulina en todos los organismos, con la excepción de las bacterias, y en todos los tipos celulares de esos organismos. En otras palabras, parece que se trata de un componente universal de las células eucariotas (provistas de núcleo). Las calmodulinas de diversos orígenes filogenéticos tienen propiedades biológicas y bioquímicas idénticas, o al menos muy similares; diríase que hasta la propia secuencia de aminoácidos de la cadena proteínica se ha conservado en gran medida. En consecuencia, la proteína está privada de especificidad de especie y de tejido. La procedente de un protozoo unicelular es capaz de activar en el tubo de ensayo un enzima como la fosfodiesterasa de cerebro bovino.

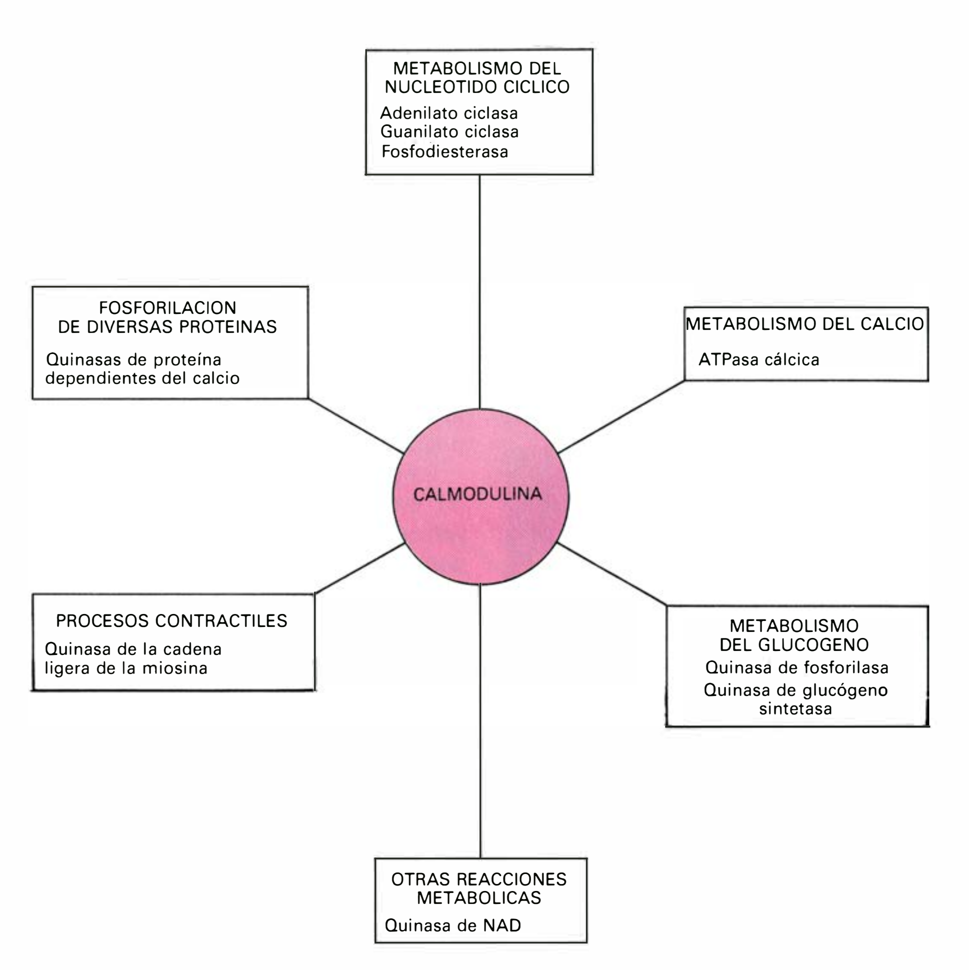
El reconocimiento de la ubicuidad e importancia de la calmodulina fue lento. Progresó a medida que se comprobaba su presencia en tejidos no cerebrales y su asociación con enzimas distintos de la fosfodiesterasa. A comienzos de la década de los 70, Thomas C. Vanaman, del Hospital Clínico de la Universidad de Duke, estudiaba una proteína cerebral que parecía una versión diferente de la troponina *c*, la proteína receptora de calcio en el músculo estriado. Cuando mis colegas y yo publicamos la composición en aminoácidos de la calmodulina, Vanaman se dio cuenta de su notable semejanza con la de su proteína y sospechó de un posible parentesco entre ambas moléculas. Me envió una muestra de su proteína para que ensayáramos si era capaz de estimular la fosfodiesterasa. Actuó aproximadamente igual que nuestra calmodulina. La verdad es que era calmodulina. Este descubrimiento, así como los resultados de otros estudios, llevaron al gradual convencimiento de que reseñas anteriores, que señalaban la presencia de troponina *c* en el cerebro y otros tejidos, andaban erradas. Probablemente la troponina *c* sólo se encuentre en los músculos esquelético y cardíaco. La proteína parecida a troponina *c* de los otros tejidos es calmodulina.

Descubrimos en mi laboratorio de St. Jude que la concentración de calmodulina en diversos tejidos no se corres-

pondía con la distribución de la fosfodiesterasa. Esto planteó la cuestión de si la calmodulina desempeñaba otras funciones, además de la activación de la fosfodiesterasa. Laurence S. Bradham, de la Universidad de Tennessee, informó en 1972 que la ciclasa de adenilato cerebral, el enzima que sintetiza AMP cíclico en ese tejido, requería calcio para alcanzar su actividad máxima. Charles O. Brostrom y Donald J. Wolff, de la Facultad de Medicina Rutgers, así como Bradham, en colaboración con nuestro grupo, realizaron experimentos que demostraron que la calmodulina activaba en el cerebro la adenilato ciclasa, además de la fosfodiesterasa.

La regulación de los enzimas de síntesis y degradación a cargo de la calmodulina parece ser perfectamente complementaria. La ciclasa de adenilato está asociada a la membrana celular, mientras que la fosfodiesterasa dependiente de calcio se halla en el citoplasma. Conforme el calcio, que penetra en la célula, atraviesa la membrana externa, se va uniendo a moléculas de calmodulina de la membrana, que activan la adenilato ciclasa. El enzima convierte ATP en AMP cíclico. Poco después, los iones cálcicos llegan al citoplasma; aquí se unen con las moléculas de calmodulina disueltas en él, que activan la fosfodiesterasa. La activación secuencial de los dos enzimas puede ser la causa del aumento transitorio en el AMP cíclico intracelular que suele observarse al estimular ciertos tejidos.

James D. Porter, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cincinnati, acaba de mostrar que ambos enzimas difieren en su sensibilidad a los iones cálcicos, lo que significaría que, durante la fase inicial de la entrada del calcio, bastarían unos niveles relativamente bajos del ion para activar la ciclasa de adenilato. A medida que sube el nivel del ion, el calcio produce dos efectos: activación de la fosfodiesterasa e inhibición de la adenilato ciclasa, con lo que rebaja el nivel de AMP cíclico con gran rapidez, hasta llevarlo a los niveles estacionarios anteriores a la activación.

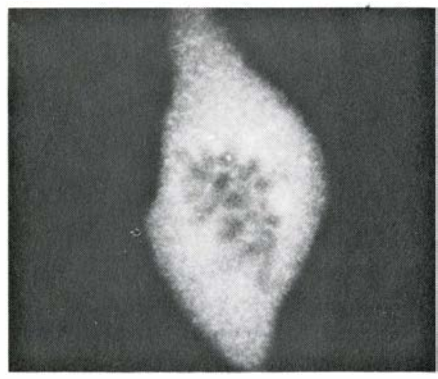
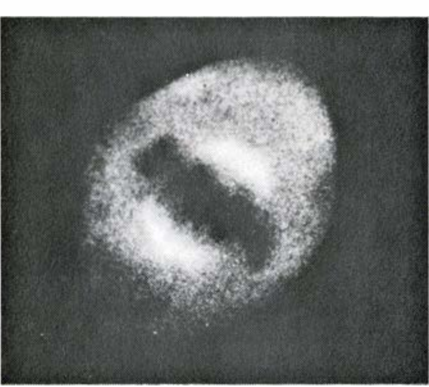
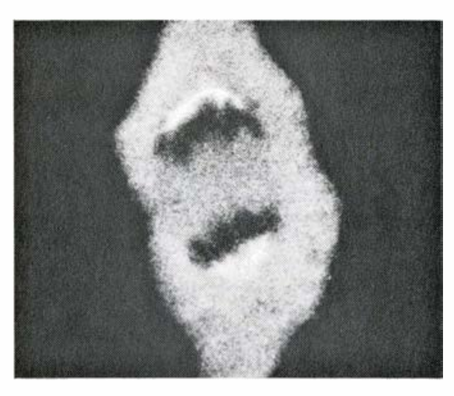
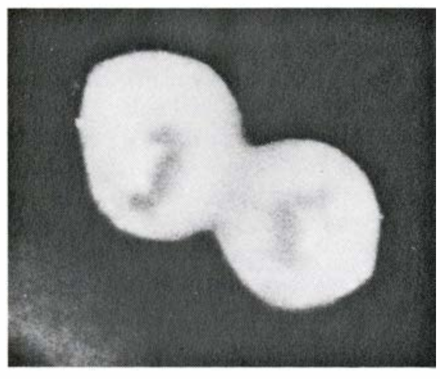
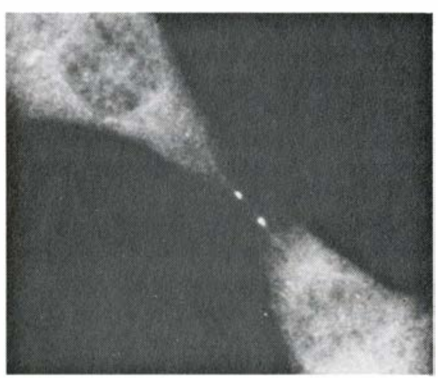


DIVERSAS FUNCIONES DE LA CALMODULINA, recopiladas aquí junto con algunos enzimas que intervienen en los distintos procesos. La adenilato ciclasa y la guanilato ciclasa catalizan la síntesis de AMP cíclico y GMP cíclico, respectivamente. La fosfodiesterasa escinde ambas moléculas cíclicas. La ATPasa cálcica es una bomba molecular que expulsa iones cálcicos de la célula. La quinasa de la fosforilasa y la quinasa de la sintetasa de glucógeno controlan los enzimas que inician, respectivamente, la degradación y la síntesis del glucógeno. La quinasa de NAD sintetiza NADP a partir del coenzima NAD (nicotín-adenín dinucleótido). La quinasa de la cadena ligera de la miosina controla la contracción del músculo liso y de células no musculares. Parece haber otras quinasas de proteína dependientes de calcio, que fosforilan diversas proteínas, incluidos enzimas que participan en la síntesis de neurotransmisores.

Ni siquiera el descubrimiento de que la calmodulina regulaba un segundo enzima en el cerebro lograba justificar su alta concentración en ese tejido (se halla en gran exceso respecto de la cantidad que se necesita para regular la adenilato ciclasa y la fosfodiesterasa), por no hablar de la presencia de calmodulina en tejidos que carecen de ambos enzimas. Pronto comenzó la búsqueda de otras funciones. Su lista sigue creciendo y la mayoría de los que trabajamos en ello no esperamos que se frene el ritmo de obtención de nuevos descubrimientos durante varios años.

En 1973, Guy H. Bond, del Medical College de Virginia, descubrió la presencia en eritrocitos de un factor que estimula la ATPasa cálcica, la bomba enzimática de la membrana celular que expulsa el calcio de la célula. Frank F. Vincenzi, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, y John T. Penniston, de la Clínica Mayo, identificaron en la calmodulina el activador de la bomba. Desde entonces se ha probado que la calmodulina activa también la ATPasa cálcica de otras células. La calmodulina tiene, pues, dos tipos de funciones: transmitir el mensaje del calcio a los enzimas receptores y modular la concentración intracelular del ion (algo que tuve presente cuando propuse el término calmodulina). Después de detectar la llegada de calcio, y activándose así para estimular al enzima, la calmodulina procede a poner en marcha la bomba que elimina el calcio que la célula no necesita.

Ya expuse que el primer receptor del calcio que se identificó fue la troponina *c* del músculo estriado. La llegada de un impulso nervioso al músculo provoca la liberación del calcio de sus depósitos situados en la porción de la célula muscular que se denomina retículo sarcoplásmico. El ion se une a la troponina *c* y altera la conformación de la molécula de troponina, iniciando una serie de interacciones entre proteínas musculares, que terminarán por catalizar la hidrólisis del ATP, liberando la energía necesaria para la contracción muscular. No obstante, en la contracción del músculo liso y de los filamentos de células no musculares, el efecto del calcio está mediado por calmoduli-

LA CALMODULINA SE CONCENTRA en el huso acromático, el aparato que separa los dos juegos de cromosomas de la célula, durante la división celular. En estas micrografías realizadas por John R. Dedman, B. R. Brinkley y Anthony R. Means, del Baylor College of Medicine, se muestra un fibroblasto (célula del tejido conjuntivo) de ratón en división. La célula se trató con anticuerpo de oveja contra la calmodulina. Se añadió un segundo anticuerpo, esta vez dirigido contra el anticuerpo de oveja y marcado con una sustancia fluorescente. El resplandor brillante indica que la calmodulina se extiende por toda la célula, pero se concentra especialmente en el huso acromático. Las micrografías muestran fases sucesivas de la división celular (*de arriba abajo*): profase, metafase, anafase, telofase y, finalmente, separación de las dos células hijas.

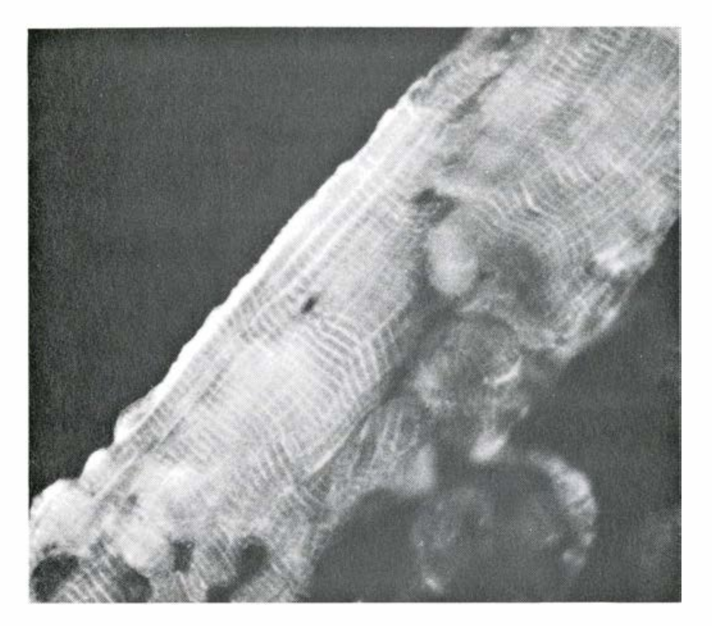
na, en lugar de por troponina *c*. David J. Hartshorne, de la Universidad de Arizona, y otros han demostrado que tras la unión con iones cálcicos la calmodulina activa una quinasa de proteína: un enzima que fosforila (añade un grupo fosfato) a otro enzima o a alguna otra proteína. La quinasa que activa la calmodulina en músculo liso fosforila un componente regulador de la proteína miosina, iniciando de ese modo determinadas interacciones, que se suponen similares a las que controla la troponina *c* en el músculo estriado.

La contracción muscular, que consume energía, está coordinada metabólicamente a una secuencia de sucesos que aportan energía. El glucógeno, que es la forma de reserva de la glucosa, constituye la principal fuente de energía con que se puede contar con rapidez, y en las células musculares hay disponibles grandes reservas de glucógeno. Al ser el glucógeno un polímero de la glucosa (una larga cadena de moléculas de glucosa enlazadas), un paso necesario para contar con la energía deberá ser su despolimerización. Cuando se estimula el músculo estriado, los iones cálcicos que libera el retículo sarcoplásmico desencadenan, además de la contracción, la despolimerización del glucógeno. En el proceso no se unen a moléculas de calmodulina libre, sino a una unidad de calmodulina, que constituye una subunidad del enzima que se activa: una quinasa cuya estructura ha desvelado Philip Cohen, de la Universidad de Dundee. La quinasa activada transfiere grupos fosfato al enzima fosforilasa, convirtiendo su forma *b*, inactiva, en su forma *a*, activa. La fosforilasa *a* inicia la degradación del glucógeno, aportando glucosa para generar ATP, el transductor universal de energía de las células.

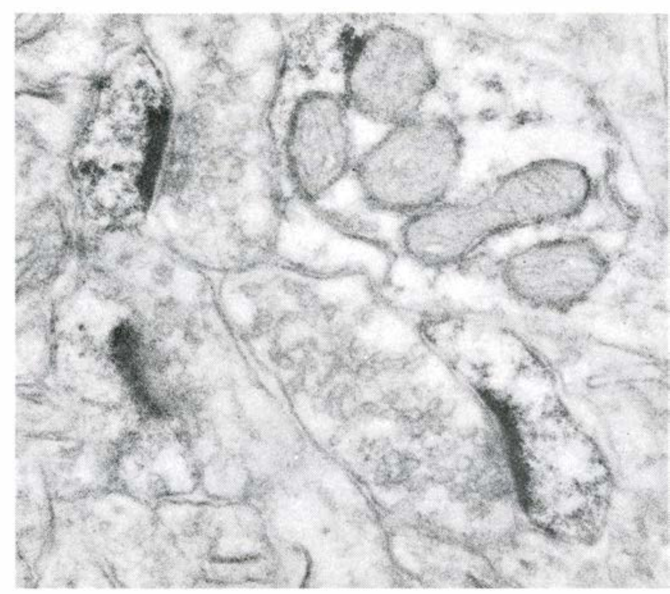
Pero aún hay más. Las células musculares disponen de un enzima para almacenar glucosa y de otro para liberarla de sus reservas. El enzima para el almacenamiento, la sintetasa de glucógeno, inicia una reacción que enlaza unidades de glucosa para formar glucógeno. Su actividad polimerizante debe interrumpirse cuando la célula muscular necesita glucosa. Thomas R. Soderling, de la Facultad de Medicina de la Universidad Vanderbilt, ha probado recientemente que la calmodulina activa la quinasa de la sintetasa de glucógeno, enzima que fosforila, y por tanto inactiva, a la sintetasa de glucógeno. El calcio y la calmodulina coordinan pues la supresión de la síntesis de glucógeno con la estimulación de su degradación. Ambas acciones están conectadas por el calcio (a través de la calmodulina) con el episodio contráctil al que sirven.

Con frecuencia, la fosforilación de una proteína constituye un paso crucial de un proceso regulador. Hay pruebas de que, además de las tres quinasas de proteína implicadas en la contracción del músculo liso y el metabolismo del glucógeno, puede haber otras quinasas dependientes de calmodulina. Paul Greengard, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, ha detectado una quinasa de ese tipo que parece fosforilar cierto número de proteínas diferentes, dependiendo de la naturaleza del tejido en que sea activa. Robert DeLorenzo, de Yale, ha encontrado en la membrana de las terminales nerviosas una quinasa dependiente de calmodulina que fosforila la proteína tubulina. La fosforilación modifica las propiedades físicas y químicas de la tubulina, que se agrega para formar estructuras filamentosas. (Los filamentos no parecen ser microtúbulos, estructuras en forma de cable que suele formar la tubulina.) DeLorenzo cree que los filamentos interactuarían con la membrana para facilitar la liberación de noradrenalina. La noradrenalina es un neurotransmisor, es decir, una de las sustancias que transmiten un impulso nervioso de una neurona a otra o a una célula muscular.

La calmodulina quizás esté también involucrada en la síntesis de los neurotransmisores. Los transmisores catecolamínicos, dopamina, noradrenalina y adrenalina, se sintetizan, partiendo del aminoácido tirosina, en varias etapas, la primera de las cuales la cataliza el enzima tirosina 3-monooxigenasa. Hitoshi Fujisawa, de la Facultad de Medicina de Asahikawa, ha demostrado que la actividad enzimática depende de una fosforilación catalizada por una quinasa, dependiente, a su vez, de calmodulina. La triptófano 5-monooxigenasa, que cataliza la transformación del ami-



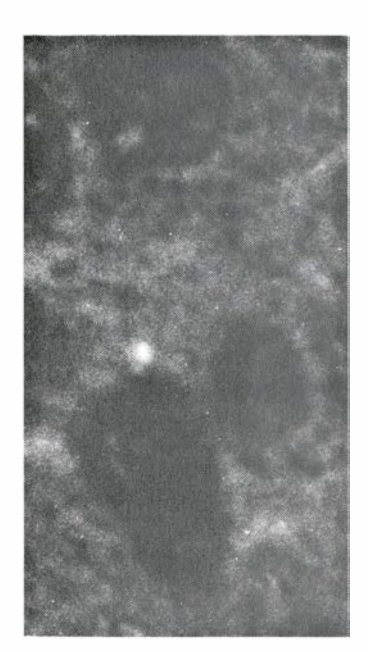
EN EL MUSCULO ESQUELETICO la calmodulina está, aparentemente, asociada con una banda (la I, según todos los visos) en la pauta repetitiva de las estriaciones transversales características de tales células musculares. También se encuentra calmodulina en una estructura longitudinal, probablemente el retículo sarcoplásmico. En esta micrografía, realizada por Jeffrey F. Harper y Alton L. Steiner en colaboración con el grupo del autor, aparece un segmento del músculo gastrocnemio de una pata de rata ampliado 800 veces. De nuevo se revela la localización del anticuerpo que se une a la calmodulina enlazándolo a un nuevo anticuerpo marcado con una sustancia fluorescente.



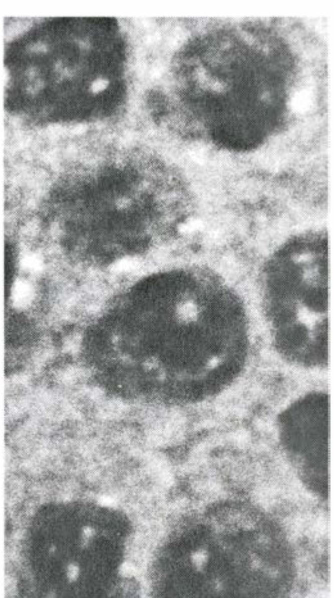
EN EL CEREBRO, la calmodulina parece estar cerca de la región postsináptica de la célula nerviosa, donde se reciben los impulsos transmitidos por otra neurona. En esta micrografía electrónica, realizada por John G. Wood, de la Universidad Emory, en colaboración con el grupo del autor, se aprecia, a 70.000 aumentos, una delgada sección de los ganglios basales de cerebro de ratón. La sección se incubó primero con un anticuerpo de conejo contra la calmodulina y luego con un anticuerpo contra el anticuerpo de conejo, marcado con el enzima peroxidasa. El colorante precipitado por la peroxidasa muestra que la calmodulina se concentra en las densidades postsinápticas.

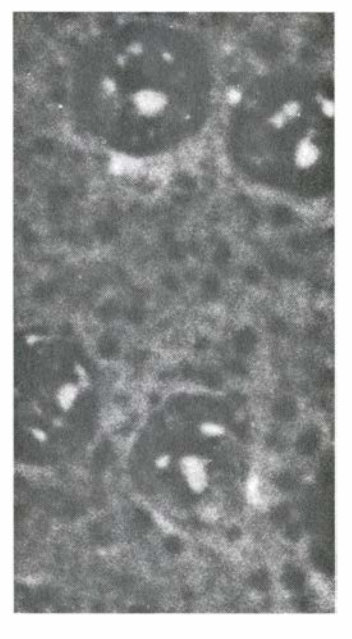
noácido triptófano en el neurotransmisor serotonina, está controlada de forma similar, a través de una fosforilación que depende de la calmodulina.

El coenzima adenín-nicotinamida dinucleótido fosfato (NADP) es indispensable para la síntesis de muchos constituyentes celulares, esteroles, nucleótidos (los monómeros de los ácidos nucleicos) y ácidos grasos incluidos. Se puede sintetizar NADP a partir del dinucleótido de nicotinamida y adenina (NAD) por medio de una quinasa específica, que Milton J. Cormier, de la Universidad de Georgia, ha probado que depende de la calmodulina. Durante las fases iniciales del desarrollo embrionario se requiere NAD y NADP para muchas actividades celulares. Se sabe que el calcio es importante en la fecundación. David Epel, de la Estación Marina Hopkins, de la Universidad de Stanford, y Robert W. Wallace y yo hemos puesto de manifiesto que









LA ESTIMULACION HORMONAL de la corteza suprarrenal de la rata parece provocar la asociación de la calmodulina con los núcleos de las células corticales. Las fotomicrografías, realizadas por Harper y Steiner con el grupo del autor, muestran tejido cortical de las glándulas suprarrenales, extirpado antes de la inyección de corticotropina (ACTH), que estimula la síntesis de las hormonas esteroideas por la corteza, y a intervalos después de la inyección. En las células sin estimular (*izquierda*) se revela algo de calmodulina por la inmunofluorescencia del citoplasma. Después de media hora (*segunda por la izquierda*) los núcleos muestran algo de fluorescencia. Al cabo de una hora (*tercera*) parece que la concentración de la calmodulina ha aumentado. A las 11 horas (*derecha*) casi toda la calmodulina aparece asociada a los núcleos, lo que sugiere que está implicada en alguna función nuclear de la ACTH.

un aumento en el nivel interno de calcio, poco después de la fecundación del óvulo de erizo de mar, conduce a una activación transitoria de la quinasa de NAD por la calmodulina. De ello resulta un aumento de la síntesis de NADP, que podría contribuir a los procesos metabólicos responsables de las sucesivas divisiones celulares que dan lugar al embrión primordial.

El guanosín monofosfato cíclico (GMP cíclico) es un nucleótido similar al AMP cíclico. Como este último, se cree que actúa de mensajero intracelular, aunque no se conocen bien sus funciones. Recientemente, Yoshio Watanabe, de la Universidad de Tsukuba, ha reseñado que en el protozoo *Tetrahymena* la calmodulina activa la guanilato ciclasa, enzima que cataliza la síntesis de GMP cíclico. Aunque la calmodulina de cualquier especie o tejido suele funcionar correctamente en otros tejidos o especies, parece que la guanilato ciclasa del protozoo sólo se activa con su propia calmodulina. Se sabe que la guanilato ciclasa de mamífero requiere calcio para alcanzar su máxima actividad, pero queda por probar si el efecto del ion sobre el enzima de mamífero está mediado por la calmodulina.

He repasado algunos de los procesos en que la calmodulina regula un enzima específico cuya función se conoce. Sin duda, la proteína posee otras actividades para las que de momento sólo se dispone de indicios no lo bastante probados. Se ha encontrado en muchos tejidos donde aún no se conoce su modo de acción. En otros casos se han identificado proteínas que se unen a la calmodulina, si bien resta por determinar qué misión desempeñan.

Una de esas proteínas es la calcineurina, que se halla, junto con la calmodulina, en muchas regiones del cerebro del ratón. La calcineurina tiene dos subunidades, una del tamaño aproximado de la calmodulina y otra mayor. Claude B. Klee, del Instituto Nacional del Cáncer, ha descubierto que a la subunidad pequeña se unen cuatro iones cálcicos, lo mismo que ocurre con la calmodulina, y que la subunidad grande se une a la calmodulina. Se desconocen los pormenores de la acción de la calcineurina; lo que no impide que ciertos resultados provisionales del laboratorio de Cohen y del mío revelen que se trata de una fosfatasa de proteínas: un enzima que cataliza la eliminación de un grupo fosfato de una proteína. Se concentra en las llamadas densidades postsinápticas, cerca de donde se sitúan los receptores de los neurotransmisores; E. Ann Tallant, un estudiante que colaboraba con nosotros, ha probado que, durante el desarrollo, su nivel aumenta con la formación de la sinapsis entre células nerviosas. Estos hallazgos apuntan hacia la intervención de la calmodulina en la neurotransmisión.

Se hallan entrelazados el metabolismo y las funciones del calcio y el AMP cíclico. Ya he explicado cómo están regulados en el cerebro la síntesis y la degradación del AMP cíclico por los iones cálcicos a través de la calmodulina. Lo mismo puede que ocurra en otros tejidos. El AMP cíclico favorece la toma de calcio por los orgánulos, como el retículo endoplásmico, en un proceso que tiende a cortar la acción iniciada por el calcio. Hay casos en los que el calcio y el AMP cíclico realizan

INTERRELACION de los dos sistemas de mensajeros intracelulares. A la izquierda, el sistema del AMP cíclico; a la derecha, el de calcio-calmodulina. La llegada de un mensaje intercelular activa la adenilato ciclasa, que sintetiza AMP cíclico. Este mensajero intracelular activa una quinasa de proteína, que fosforila alguna proteína efectora, estimulando o inhibiendo su actividad biológica. De forma similar, la calmodulina, tras ser activada por iones cálcicos, activa una proteína efectora que inicia la respuesta biológica. El calcio estimula la actividad de la adenilato ciclasa y la de la fosfodiesterasa (*PDE*), que escinde el AMP cíclico. El calcio modula el metabolismo del ácido graso prostaglandina (*PG*), que guarda semejanza con las hormonas, y que, a su vez, influye sobre el metabolismo de la adenilato ciclasa. Puede que el AMP cíclico actúe sobre la disponibilidad de iones cálcicos en la célula, quizás activando la fosforilación.

acciones contrapuestas. Por ejemplo, en el músculo liso parecen ejercer efectos opuestos sobre la quinasa de la cadena ligera de la miosina, el enzima que inicia la contracción. La calmodulina activada por el calcio estimula el enzima. Robert S. Adelstein, del National Heart, Lung and Blood Institute, ha recabado pruebas que sugieren que el AMP cíclico reduce la estimulación del enzima, rebajando el efecto del calcio. En otros casos se da la circunstancia de que el calcio ejerce en un tejido una función que el AMP cíclico desempeña en otro tejido. La estimulación de la fosforilasa para degradar el glucógeno la suelen realizar el calcio y la calmodulina en el músculo y el AMP cíclico en el hígado.

Los sistemas de calcio-calmodulina y de AMP cíclico tienen distintos atributos, que pueden explicar por qué estos sistemas actúan bajo diferentes circunstancias. La calmodulina se halla en todas las células; el calcio abunda en el medio extracelular. Para iniciar alguna acción no es necesaria, por tanto, la síntesis de esas sustancias, de ahí que el sistema del calcio sea, por propia naturaleza, de acción rápida. El AMP cíclico, en cambio, debe sintetizarse de novo bajo la acción de la adenilato ciclasa, cuando ésta se estimula, y ello requiere algún tiempo.

El receptor más importante para el AMP cíclico en las células eucariotas es una quinasa de proteína, activada por el AMP cíclico, que puede fosforilar cierto número de proteínas sustrato. El sistema del calcio, en cambio, comprende al menos tres distintas quinasas dependientes de la calmodulina, que fosforilan sustratos específicos, y probablemente comprenda varias otras quinasas dependientes de calmodulina, que fosforilan varios enzimas. Es más, por mediación de la calmodulina, el calcio regula muchos otros enzimas, además de las quinasas de proteína. Merced a su flexibilidad, la calmodulina puede interactuar con múltiples enzimas efectores, lo que hace al ion calcio mucho más versátil que el AMP cíclico.

En los mamíferos, los mensajeros celulares más importantes son las hormonas, el AMP cíclico y el calcio. En la mayoría de los casos, las hormonas permiten la comunicación de unas células con otras. Por su parte, el AMP cíclico y el calcio llevan mensajes de una parte de la célula a otra. Los tres mensajeros tienen papeles complementarios, tanto con respecto al tiempo como en relación con la distancia. En las hormonas, el tiempo de respuesta y la duración de la acción va de minutos a horas, y aun semanas. En el AMP cíclico, el intervalo es de segundos a minutos y, en el calcio, probablemente sea del orden de milisegundos. Las hormonas se suelen calificar de "primeros mensajeros" y, el AMP cíclico, de "segundo mensajero". Teniendo en cuenta la proporción en que el metabolismo y las funciones del ion cálcico y el AMP cíclico se imbrican y se solapan en el tiempo y el espacio, tal vez resulte más exacto referirse a uno y otro como mensajeros o reguladores celulares que no intentar ordenarlos como segundo y tercer mensajeros de un determinado proceso.

El descubrimiento de la calmodulina ha desvelado en buena medida el modo de acción del calcio a nivel molecular. Ha resultado ser particularmente útil para elucidar las variadas acciones de la calmodulina un agente que contrarresta la actividad de la proteína. Benjamin Weiss, de la Facultad de Medicina de Pennsylvania, reseñó a mediados de los años 70 que la trifluoperazina, un agente antipsicótico, inhibía la actividad de la calmodulina al impedir la interacción de la proteína con los enzimas receptores. La ayuda de este fármaco ha sido inestimable a la hora de identificar las funciones biológicas de la calmodulina. Ha estimulado, además, nuevos esfuerzos encaminados a diseñar y definir qué fármacos afectan a las acciones del calcio mediadas por la calmodulina y a otros aspectos de la acción y metabolismo del calcio.

¿Cómo se explica que la calmodulina, que participa con carácter casi omnipresente en todos los procesos celulares iniciados por el calcio, se haya mantenido oculta a los investigadores durante varias décadas, mientras estos procesos se sometían a un intenso estudio? La respuesta hay que buscarla en la ubicuidad y abundancia de la calmodulina. A diferencia del AMP cíclico, por ejemplo, la calmodulina no parece ser un factor limitante de la actividad celular; dada su constante presencia en las células y los extractos celulares, nunca se la echa en falta. Su relevancia sólo quedó al descubierto cuando se la eliminó, por rutina, en la purificación de la fosfodiesterasa. La pérdida de actividad enzimática en el curso de una purificación no suele representar más que una molestia. En el caso de la fosfodiesterasa tuve la suerte de que la discrepancia entre los resultados de dos procedimientos de ensayo señalaran la naturaleza del problema: la eliminación de un activador que resultó ser la calmodulina.

Ciencia y sociedad

La ciencia por Altamira

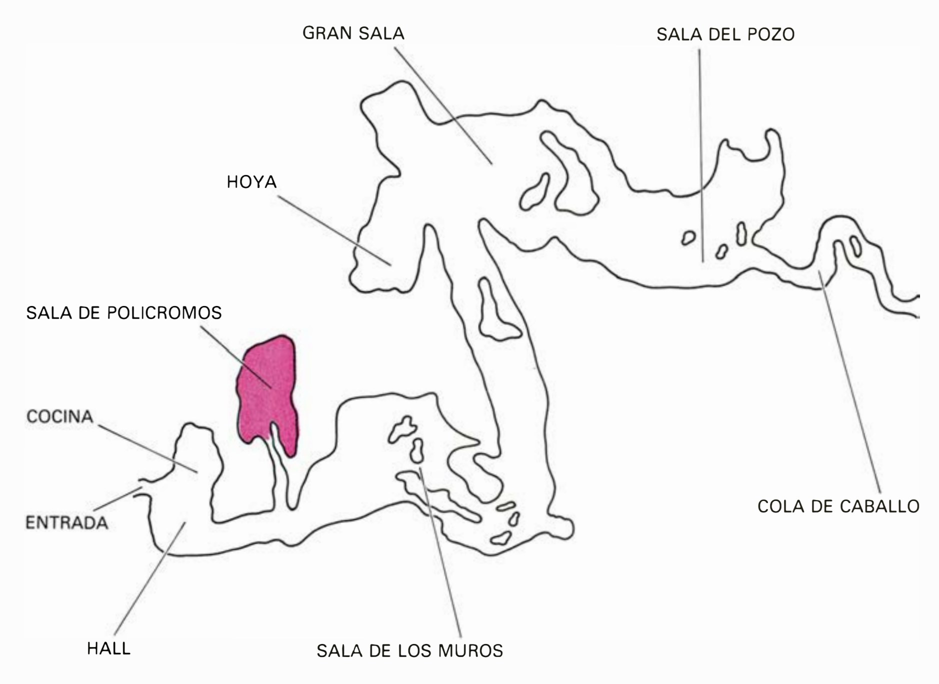
La conservación de las pinturas de la Cueva de Altamira ha constituido una preocupación constante desde su hallazgo. Ya en el año 1879, su descubridor, Marcelino Sanz de Sautuola, hace construir una puerta de madera, la primera que protege la entrada de la cueva, puerta que al año siguiente es sustituida por otra de hierro, sufragada por el ayuntamiento de Santillana del Mar, que asume desde entonces la custodia del recinto. En 1910, este ayuntamiento crea la Junta de Conservación y Defensa de la Cueva de Altamira y en 1925 cede la explotación y administración a una comisión de alcance nacional, pasando en 1940 a depender de un patronato creado por orden ministerial. En 1978 pasa a ser propiedad del estado. Durante esa larga historia, varias y muy diferentes comisiones administrativas y científico-técnicas se han ido constituyendo para atender a su estudio y conservación.

Las investigaciones que ahora se han iniciado debían contemplar el hecho de que la puesta en práctica de estos proyectos y decisiones anteriores habían conducido a realizar actuaciones bien concretas sobre la cueva, transformándola de tal modo que tanto el recinto como las condiciones ambientales eran muy diferentes de los originales. El proyecto actual corre a cargo de la Universidad de Santander.

Las pinturas que hoy observamos no son las que pintó el hombre primitivo; han desaparecido en parte al estar sometidas a procesos físico-químicos naturales. Si el término conservación se constriñe al período de tiempo transcurrido desde su descubrimiento, se da la circunstancia de que se ignora el microclima que entonces gobernaba la cueva, para intentar reproducirlo inspirándonos en el hecho de que era tal que favoreció el que las pinturas llegaran hasta nosotros 16.000 años después. A través de estos milenios las características ambientales de la sala se han ido modificando, dadas las condiciones que existieron mientras fue habitáculo del hombre magdaleniense-solutrense, con una ocupación humana prolongada, quizá masiva, aunque fuese periódica, encendiendo hogueras para calentarse y para asar la caza.

Esta cueva de origen kárstico fue experimentando las transformaciones hidrogeológicas correspondientes, que parecen ser la causa de la obstrucción de la boca de la cueva, debida a un gran desprendimiento de estratos, que la ocultó del exterior desde finales del Paleolítico; por último, el microclima de la cueva se vio afectado por las extremas variaciones del clima exterior sufridas en Altamira, y, por tanto también las pinturas, que parecen ser anteriores a las postrimerías de la última glaciación y durante la cual la región cantábrica soportó un clima tan frío como el de los actuales países escandinavos. Por todas estas razones una idea clara a la hora de elaborar el proyecto ha sido que lo que se intenta conservar es el estado actual de las pinturas. Esta situación, que arranca de mayo de 1980, se considera punto cero.

La Cueva de Altamira está situada cerca de la superficie de un pequeño cerro formado por un lecho de estratos calizos, calcarenitas compactas, prácticamente horizontales de 20 a 100 centímetros de espesor, entre los que existen finas capas arcillosas de grosor variable. Este conjunto calcáreo llega a tener unos 60 metros de espesor. La cueva mide unos 270 metros de longitud. Se trata de una caverna originada por el desplome gravitacional de los estratos citados, como consecuencia de la acción continua de las aguas subterráneas filtradas desde el exterior, actualmente procedentes de las lluvias; aguas que fluyen hacia zonas más profundas, que vierten finalmente en el río Saja. El karst se encuentra en un proceso de escasa actividad. En particular, la "sala de polícromos" tiene un volumen de 326 metros cúbicos, con una altura media entre suelo y techo de 2,5 metros, siendo de 7,5 metros el espesor medio de la techumbre de estratos hasta el exterior. Se trata pues de una sala relativamente pequeña si la comparamos con la "gran sala" de 8,5 metros de altura y con anchuras de casi 30 metros. Viene a ser como un apéndice de un tubo digestivo que sería el resto de la cueva, comunicándose con ella mediante una boca de apenas 4 metros cuadrados. El techo de la sala de pinturas presenta unos abultamientos de curvaturas suaves, sabiamente aprovechados por el hombre magdaleniense para dar un especial relieve a las soberbias figuras de animales que allí representó, pero cuya probabilidad de hundimiento preocupó desde el descubrimiento de la cueva, sobre todo si se presupone que estas deforma-



Plano de la Cueva de Altamira con indicación de los nombres de las diferentes salas. La zona rayada corresponde al ecosistema en estudio

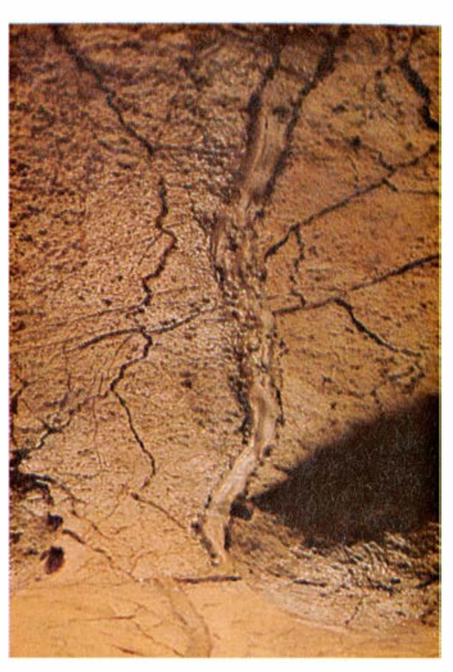
ciones están originadas por un campo de tensiones que flexionan los estratos. Ello motivó que se levantaran muros de grandes dimensiones (1924-1935), remedando la forma y el color de las auténticas paredes de la cueva, con el objeto de reforzar la sujeción de los techos. Con este mismo fin y para evitar además el continuo flujo de agua que impregna el techo de la sala de pinturas se llegó a inyectar entonces cemento hidráulico entre las grietas.

Para los objetivos de la investigación se considera a la "sala de polícromos" como un ecosistema definido por las superficies internas que la limitan, naturales y artificiales, incluidas las superficies policromadas y la superficie ideal de la abertura que la separa del resto de la cueva; por el aire que en todo instante llena el recinto, aire caracterizado por una composición química, especialmente por un contenido de anhídrido carbónico y vapor de agua, y posibles contaminantes y humos; por el agua que impregna o circula por las paredes, techo y suelo, agua portadora de sales disueltas, de anhídrido carbónico y de posibles materiales de arrastre; y por las poblaciones microbianas y otras especies biológicas, existentes en el aire, en las aguas y en las superficies rocosas o arcillosas. Este ecosistema, en ausencia de visitantes, se comportará como un sistema abierto en el sentido termodinámico, capaz de interaccionar con el medio que le rodea intercambiando materia y energía a través de sus superficies. La interacción principal tendrá lugar con el ambiente exterior de la cueva y con las restantes salas de la misma. Se ha admitido, además, la posibilidad de definir, a partir del estado actual de las pinturas, una gama de estados cuasi-estacionarios del ecosistema, tal que las características particulares de las superficies policromadas se hallen dentro de pequeñas variaciones reversibles.

Se decidió desarrollar el estudio en tres etapas. En la primera se trataba de establecer la dinámica general interna del ecosistema a través de una descripción de su microclima. ¿Cómo? Buscando correlaciones cuantitativas y parametrizando el mayor número de variables; estudiando la estabilidad de la película policromada frente a los agentes físico-químicos previsibles y controlando su constancia por medición de sus características cromáticas y sus posibles variaciones naturales en función de los factores ambientales; determinando la estabilidad estructural del ecosistema, sobre todo frente al hundimiento, mediante un estudio hidrogeológico; y realizando un estudio de las poblaciones microbianas, especialmente desde el punto de vista de su actividad química. Con la segunda etapa se describirían los procesos físicoquímicos y geofísicos que pueden tener lugar sobre las pinturas. Entraba aquí proponer un régimen provisional de visitas convencionales, inicialmente con un reducido número de personas e incrementar este número progresivamente, estudiando la respuesta del ecosistema. La tercera etapa consistiría en establecer un control de plazo indefinido, mediante un registro automático y permanente de datos.

Estas etapas se están cubriendo a través de metódicas campañas de medidas. Se ha realizado una descripción del campo de temperaturas de la cueva y de su evolución con las estaciones climatológicas utilizando sondas constituidas por termómetros de resistencia y por termopares, bien en conexión con un registrador gráfico electromecánico de tipo continuo o bien a través de un monitor electrónico, y también haciendo uso de termómetros convencionales de décimas, así como de un termómetro de radiación que no requiere contacto. Este campo de temperaturas viene determinado por el flujo calorífico de origen solar, por el flujo geotérmico y por los flujos de calor sensible y latente debidos a intercambios de materia con el exterior. El conocimiento de los gradientes térmicos, de las temperaturas tanto del aire como de las superficies rocosas de las diferentes salas y de sus variaciones anuales, en conexión con la climatología exterior, ha permitido obtener también una descripción de la ventilación originada por los movimientos convectivos de las masas de aire y una comprobación cuantitativa de las oscilaciones de temperatura de los diferentes techos originadas por la onda térmica estacional que se propaga desde la superficie exterior; para ello se han realizado, además, determinaciones de temperaturas encima mismo de la techumbre de la sala de pinturas con una caseta meteorológica y con un juego de termómetros de subsuelo situados a diferentes profundidades.

El proyecto contempla la evaluación de flujos de materia en la "sala de polícromos", flujos que, omitiendo los de materia viva, derivan de la dinámica hidrológica y atmosférica de su microclima. Uno de los métodos que proporciona determinaciones cuantitativas sobre la ventilación se basa en las variaciones temporales del gas radiactivo na-



Gran grieta del techo en la que se inyectó cemento hidráulico, de acuerdo con un amplio proyecto realizado entre 1924 y 1928

tural, radón, conociendo el volumen de la sala y el valor de la exhalación. Los caudales de agua más significativos que se recogen en ella, procedentes de diferentes puntos de goteo del techo y las variaciones de este flujo con el tiempo, se han correlacionado con la pluviometría de la zona de Altamira. Los flujos de agua y de aire así como el campo de temperaturas determinan el grado de humedad. Las conclusiones que se obtienen sobre la cantidad de agua que se pone en juego en los procesos de evaporación y condensación son coherentes con los que se deducen de un tratamiento termodinámico.

Debido a su gran capacidad de ionización y elevada reactividad, el agua realiza una lenta disolución y arrastre de los pigmentos que constituyen las pinturas así como de su soporte. Pero además es vehículo de toda una serie de sustancias recogidas a lo largo de su itinerario, desde las que capta en la atmósfera exterior durante su caída en forma de lluvia, que puede incluir contaminantes atmosféricos (en el caso de Altamira existen grandes industrias a unos ocho kilómetros), hasta los que encuentra a su paso ya dentro del terreno, primero por una capa terrosa de aproximadamente 40 centímetros de espesor y después por entre las fisuras de las calcarenitas y arcillas, a través de siete metros de recorrido hasta aflorar en el techo de la sala de pinturas. Entre otras sustancias, el agua es portadora

de anhídrido carbónico. Los intercambios de masas de aire entre esta sala y las restantes y entre éstas y el exterior originan variaciones en las concentraciones de vapor de agua, anhídrido carbónico y contaminantes en la atmósfera de la sala. En particular, la concentración del anhídrido carbónico y la humedad relativa del aire están ligadas íntimamente a la dinámica general del ecosistema. La importancia de los flujos entrante y saliente de CO_2 y de agua es máxima, en cuanto que la primera puede dar lugar a un posible velado u ocultación de las pinturas al originarse depósitos de carbonatos insolubles y la segunda determina el nivel de agua que baña estas pinturas, afectando por tanto a su disolución y arrastre y también a posibles procesos de desecamación, si existiesen cambios en la humedad relativa por debajo de la saturante.

El anhídrido carbónico disuelto en agua resulta fundamentalmente de procesos de descomposición de materia orgánica y de la actividad de las raíces vegetales, pudiendo variar por el equilibrio que se establece entre el anhídrido carbónico y los iones procedentes de la disolución de los carbonatos al pasar el agua por entre las fisuras de los estratos calcáreos. A una temperatura del orden de la que reina en la cueva, el CO_2 podría disolverse a razón de un litro de gas por un litro de agua. La máxima cantidad de este gas que se disuelve en agua pura por unidad de volumen viene dada a cada temperatura por el coeficiente de solubilidad y por la presión parcial de este gas (y por tanto, por su concentración en la atmósfera que atraviesa el agua). El gas disuelto reacciona con el agua dando ácido carbónico, que se disocia instantáneamente en ion bicarbonato y éste a su vez en ion carbonato, liberando hidrogeniones que acidifican el agua. Este último ion, por ser el ácido carbónico un ácido débil, es capaz de hidrolizarse a su vez produciendo iones hidroxilo, que neutralizan la acidez. El proceso es pues, interactivo, un exceso de CO_2 disminuye la concentración del CO^-_3 en el agua, por lo que aumenta la disolución de la calcita en forma de bicarbonato cálcico. El aire normal con un contenido de sólo 33 centímetros cúbicos de CO_2 en 100 litros es capaz de disolver alrededor de 60 partes por millón de carbonato cálcico en contacto con agua pura. Por otra parte, si el agua no es pura, si es una disolución, presenta una fuerza iónica que depende de la concentración molal y del cuadrado de la carga eléctrica de todos los iones presentes. Esta fuerza iónica puede aumentar en un factor importante la cantidad de calcita disuelta.

Las aguas que impregnan y gotean desde el techo de la "sala de polícromos" llevan diferentes sales disueltas y además entran en contacto con la atmósfera de esta sala, con un contenido de CO_2 que en ocasiones llega a ser 30 veces superior al de la atmósfera normal del exterior. Un aumento del CO_2 del agua, o cualquier tipo de acidez anómala, puede llevar el *p*H a valores inferiores al del equilibrio, haciendo que se disuelva más carbonato. Si el *p*H superara al del equilibrio, por disminuir el CO_2 disuelto en el agua, como ocurre cuando se ventila la sala por entrada del aire del exterior, el agua podría llegar a hacerse incrustante, es decir, con tendencia a precipitar calcita. Existen pues unos márgenes del *p*H del agua y de la concentración de CO_2 en la sala de la cueva, entre los que puede asegurarse que no precipitarán carbonatos sobre las pinturas. Aunque las aguas subterráneas naturales, por lo general, tienen el carácter de disoluciones tampón, es decir, presentan una gran estabilidad de su *p*H, la peligrosidad de los efectos de carbonatación citados impone sin embargo realizar un estudio profundo.

Por otra parte, se ha hecho uso tam-





Fotografías parciales de dos bisontes distintos. En la superior se ha conservado relativamente bien el color rojo; en la inferior se nota la decoloración sufrida por disolución y arrastre

bién de espectrómetros de absorción atómica con el fin de determinar la concentración en el agua de ciertos elementos químicos que forman parte de los pigmentos que parece ser que sirvieron para elaborar las pinturas del hombre paleolítico. Estos análisis pueden suministrar información sobre el límite máximo de la rapidez de disolución de las pinturas, así como de la roca soporte. Se han realizado medidas de la contaminación del aire del exterior y del de la sala por los métodos convencionales. Las variaciones periódicas que experimenta la concentración del anhídrido carbónico en la atmósfera de la sala de pinturas se ha correlacionado con las diferencias de temperatura existentes entre ésta y las de otras salas, dando resultados coherentes con la ventilación.

Una de las causas de alarma que llegó a motivar el cierre de la cueva en 1977 fue observar que, a primera vista, parecía que se había producido una fuerte decoloración en una de las figuras policromadas más características: la cierva; precisamente una profunda fisura natural atraviesa el cuello del animal; la parte derecha presentaba una coloración menos intensa que la zona situada en la parte izquierda de la grieta. La medida objetiva del color constituye uno de los métodos para detectar la evolución de las pinturas en el tiempo. Para esta determinación se dispone de un espectroradiancímetro, que actúa como colorímetro digital, en conexión con un monitor electrónico de toma de datos y de un ordenador que programa la realización de las medidas y que elabora los datos recogidos, suministrando los resultados a una impresora y a un plotter.

Este dispositivo proporciona el color físico del estímulo luminoso, los valores triestímulo y las diferencias de claridad, croma y tono con los de un blanco patrón. Con esta instrumentación se han determinado las características cromáticas de más de un centenar de puntos bien definidos del techo policromado de la cueva, lo que constituye un registro testimonial del color actual de las pinturas. Estas medidas son reproducibles dentro de errores despreciables y se realizan cada seis meses sobre los mismos puntos, localizados en una docena de figuras polícromas distintas y elegidos por tener un color muy intenso, por haber desaparecido prácticamente la pintura, o por otra característica suficientemente significativa. Además de esta prueba testigo para futuras determinaciones colorimétricas, se realizan también medidas sistemáticas, espaciadas a intervalos de tiempo más cortos, sobre unos cuarenta puntos entre estos mismos, con el fin de determinar las posibles variaciones naturales de color con las fluctuaciones periódicas de humedad y temperatura.

En el aspecto puramente geológico, se han realizado estimaciones sobre la resistencia de los estratos a la compresión y, por tanto, sobre el coeficiente de seguridad del techo frente al hundimiento; se ha dedicado una atención especial a la circulación kárstica y a los factores que pueden influir en la misma, determinándose qué zona de recogida de agua de lluvias puede influir en el flujo que alcanza el techo de la cueva. Se han realizado sondeos eléctricos para determinar posibles acumulaciones de agua en los estratos de la techumbre de la sala de pinturas. Es de especial interés el nivel a que se encuentra la cueva dentro del aparato kárstico, la distribución y magnitud de



El cuello de la cierva de Altamira presenta distinta coloración a derecha e izquierda de la grieta que lo cruza. Muchas personas opinaban que esta diferencia de color se había acentuado a partir de las visitas. En el anca puede observarse una mancha blanca producida por depósitos calcáreos



Desescamaciones de la película policromada

las diaclasas, el grado de alteración del techo por corrosión, si existen formaciones incipientes de raíces de estalagmitas, entre otras. La estabilidad de la superficie soporte de las pinturas está en función de sus características mineralógicas, de las que dependen las alteraciones que puede experimentar con las fluctuaciones de las condiciones ambientales del ecosistema y con la composición química de los flujos hidrológicos.

En cuanto a la contaminación microbiana de la Cueva de Altamira, de acuerdo con el proyecto, se han estudiado los grupos fisiológicos especializados tomando muestras en los mismos puntos en los que con anterioridad se habían realizado ya recuentos de microorganismos con el fin de llevar a cabo un análisis comparativo, teniendo en cuenta que el estudio actual se realizó prácticamente tres años después del cierre de la cueva. A través de medios de cultivo y reactivos adecuados se ha realizado un recuento de bacterias, levaduras y hongos del aire, tierra y agua en dichos puntos; se ha hecho hincapié, más que en una clasificación de especies, en una clasificación y evaluación cuantitativa de la actividad química de la flora microbiana encontrada en las muestras. Así se ha determinado el número de microorganismos, por gramo de tierra o por centímetro cúbico de agua, capaces de reducir los sulfatos, así como de amonificadores, nitrificantes, desnitrificantes, etcétera.

Con este proyecto se ha intentado abordar una programación de objetivos coherente, con el fin de llegar a algunas conclusiones a corto, medio y largo plazo. Pero dada la importancia cultural de este legado del hombre paleolítico, el proyecto se ha concebido pensando que, además de realizar una investigación programada que cubriese las etapas citadas, debería planificarse una investigación de seguimiento indefinido basada, por un lado, en los datos que suministrase un equipo instrumental de control, de funcionamiento permanente y, por otro, en las conclusiones e hipótesis que se fueran alcanzando a fin de detectar, bien cualquier situación anómala que pudiera amenazar las pinturas o bien nuevos aspectos que permitieran perfeccionar las condiciones impuestas para su conservación. Por último, dentro de la tercera etapa se ha considerado que cualquier decisión deberá tomarse siempre de acuerdo con algunos criterios de suma prudencia, como son: limitar los índices de ocupación humana en la "sala de polícromos" a valores simpre inferiores a lo que permitieran las conclusiones, no llevar a cabo jamás acciones drásticas ante la duda de llegar a producir alteraciones irreversibles, no interrumpir nunca las medidas sistemáticas de control y considerar que las conclusiones obtenidas deben someterse a una revisión y confrontación constantes. (Eugenio Villar.)

Producción biológica

La sucesión del fitoplancton comienza cuando la mezcla uniformiza la distribución vertical de nutrientes y dispersa los organismos por toda la masa de agua. La primera utilización de los nutrientes se da en las capas iluminadas. Cualquier átomo de un elemento que deje de estar en la solución de agua para pasar a formar parte de un organismo o de una partícula sólida aumenta su probabilidad de desplazarse hacia abajo.

El transporte vertical a lo largo del sentido de la gravedad puede ser pasivo (sedimentación) o activo. Es también una consecuencia de las migraciones de los animales planctónicos. Aunque el zooplancton contribuye a la recirculación de los elementos en la zona fótica, normalmente los animales defecan en capas inferiores al nivel en que se alimentan. Es más, los copépodos y los eufáusidos producen unas píldoras fecales compactas que se hunden rápidamente, sin dar tiempo a su descomposición. Resulta de este y otros tipos de interacciones internas del ecosistema una amortiguación general de la dinámica del plancton, a través de la segregación de los elementos de producción: donde hay luz, los nutrientes se agotan; donde se acumulan, es que no hay luz. La productividad decae progresivamente hasta un límite que viene definido por el transporte vertical basado en la difusión molecular y en la difusión turbulenta remanente. Cualquier incremento de la turbulencia restablece el proceso global, lo que suele ocurrir de forma bastante abrupta, en el marco de aquella regularidad de orden superior que permite los sucesos aleatorios pero que postula un patrón asimétrico para cada suceso individual: una desorganización rápida seguida de un cambio más lento hacia la segregación local.

G. A. Riley, H. Stommel y D. F. Bumpus postularon en 1949 un marco teórico útil para el estudio del fitoplancton. Su expresión puede aplicarse tanto al fitoplancton como a los nutrientes, y sus resultados, combinados, condujeron a una nueva expresión que merece comentario [*véase el cuadro superior de la página siguiente*].

En síntesis, esa expresión viene a decir que la producción es igual a la suma del suministro exterior más la turbulencia multiplicada por la covarianza de las distribuciones. El suministro exterior representaría los recursos no renovables y denotaría una dependencia del exterior; por su parte, el producto de la turbulencia por la covarianza representaría los recursos renovables y demostraría un control interno.

La distinción entre recursos renovables y no renovables es cuestión de escala. Si el espacio de referencia es lo bastante grande, los compartimentos relacionados se engloban en un solo compartimento, se internalizan los ciclos de los elementos y no hay exportación de excedente de producción. Esta fuerte dependencia de la escala está en consonancia con la cualidad espectral de la difusión turbulenta y de la covarianza de las distribuciones, los dos parámetros más importantes a la hora de precisar el comportamiento del sistema.

La producción biológica resulta del producto entre la difusión turbulenta y la covarianza de las distribuciones de reactivos (luz, células, nutrientes).

Tanto la difusión turbulenta como la covarianza de la distribución de reactivos hacen referencia a una célula de medición de tamaño definido. Cada uno de los componentes materiales está sujeto a una ecuación de continuidad que incluye un cambio (biológico). La covarianza ha de estudiarse a lo largo de las distribuciones de espacio y tiempo resultantes. El límite inferior de A (difusión turbulenta) viene dado por la difusión molecular o la viscosidad; la covarianza máxima de la distribución de los factores de producción correspondería al modelo de una mezcla de moléculas de gas dentro de un recipiente, de acuerdo con los presupuestos básicos de la termodinámica.

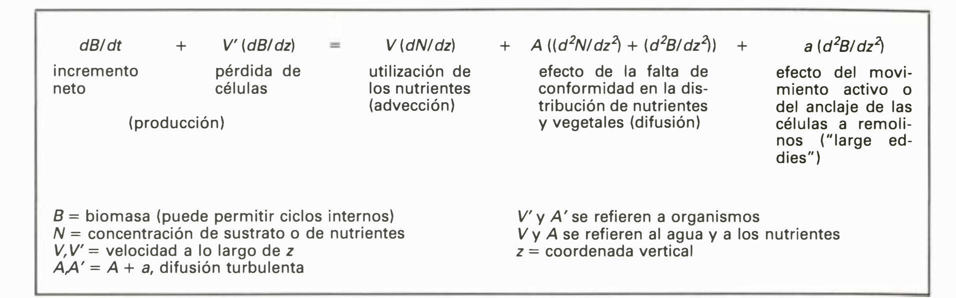
Podría sospecharse que en el mundo real del plancton la covarianza de la distribución de los reactivos es proporcional a la difusión turbulenta, que depende de la energía cinética disponible. La producción sería entonces proporcional al cuadrado de A. En realidad no lo es, pues en el agua no hay energía mecánica que pueda desplazar a los fotones y uniformizar la disponibilidad de la luz. La distribución vertical de la radiación disponible, al ser un factor esencial en la producción, establece un límite a la covarianza entre los factores

de producción biológica. Este hecho destaca la peculiar posición de la radiación en los sistemas naturales. Resulta de todo ello que la producción es máxima para valores intermedios de A, y no crece monótonamente con A. Supongamos que, mediante un artilugio apropiado, el hombre suministrase luz a las capas profundas del océano. Ello requeriría más energía externa, y el modelo, simplemente, se ampliaría.

Cuando un ecosistema cambia en el sentido de la sucesión, la organización que va generándose conduce a una parsimoniosa interacción entre los diversos candidatos a la reacción y a su segregación efectiva. No podemos apartar de nosotros la sensación de que el mundo se compone de objetos mal situados, en el sentido de que las estructuras se conservan sólo gracias a que el aislamiento espacial de los reactivos impide su transformación o aniquilación. No guarda esto mucha relación con el modelo común de las partículas de un gas que intenta ocupar uniformemente o de forma aleatoria el interior de un recipiente ideal. El mundo real más parece resultar de la "inestabilidad de lo homogéneo", expresión que se recoge en alguno de los escritos de Herbert Spencer.

Como se ha dicho, los reactivos potenciales quedan separados, en la naturaleza, por una cuarentena de espacio, y lo que existe no son sino los residuos de reacciones anteriores. Casi todo el mundo está hoy de acuerdo al respecto. Me impresionó recientemente leer que posiblemente la materia y la antimateria se creen en cantidades iguales; la coctelera cósmica las agitaría; la mayor parte reaccionaría, desapareciendo; quedaría una pequeña porción de materia, en la que nos hallamos, y probablemente también antimateria en algún alejado punto; el espacio sería el aislante.

Existe una conversión constante de energía en organización. Las estructuras crecen a medida que funcionan. La complicación del sistema frena las velocidades de cambio. Las células "queman" despacio porque los enzimas frenan muchas reacciones que, de otro modo, discurrirían de forma incontrolada. En una generalización algo metafórica podríamos añadir que el sexo frena la reproducción, el pensamiento frena la acción y la burocracia frena el metabolismo social. El conjunto de propiedades que exhiben los sistemas complejos y que conducen a un incremento de la complejidad no encuentran fácil acomodo en el marco que proporciona



Marco teórico para el estudio del fitoplancton

producción biológica = suministro del exterior + A x (covarianzas)

$$dN_i/dt = \sum_{k=1}^{\text{recursos no renovables}} b_{ik} R_k N_i + \sum_{j=1}^{\text{recursos renovables}} a_{ij} N_i N_j$$

términos estocásticos (R_k) — interacción determinística

Producción biológica

una visión elemental, profana, de la termodinámica. Tampoco estoy muy seguro de que gran parte de la discusión sobre inestabilidades y sistemas abiertos tenga verdaderamente importancia en el asunto. La avidez con la que la naturaleza transforma la energía disponible en organización se manifiesta claramente en el acoplamiento entre subsistemas de distinto grado de organización, como el plancton y el bentos, por si no se evidenciara lo suficiente en los cambios endógenos de cualquier sistema, en cuyo caso la transferencia se hace a lo largo de la dimensión temporal: la energía degradada en la organización de hoy se refleja en la organización de mañana.

Volviendo a la descripción de la dinámica del plancton, las expresiones propuestas más arriba pueden compararse con otras representaciones, quizá más acordes con la tradición ecológica. Pretenden descubrir el cambio de los valores de cada uno de los componentes o especies i (N_i) en relación con los valores de cada una de las otras especies con las que interactúa la primera. Los coeficientes de interacción (a_{ij}) no deben considerarse propiedades intrínsecas del sistema, sino más bien medias estadísticas que describen un hecho pasado. Creo razonable proponer la comparación del cuadro inferior de esta página.

Los ecólogos prefieren trabajar con modelos reducidos al segundo bloque de términos, el determinístico, pero parece obvio que una buena parte del cambio viene inducido desde el exterior, y en forma preliminar puede introducirse como entradas estocásticas (R). Al aumentar el tamaño del sistema o el marco de referencia, las entradas estocásticas resultan más determinables, al menos en teoría. El cambio de representación resultante es el mismo en las dos aproximaciones al ecosistema. La suma de los productos $N_i N_j$ es una medida de la covarianza, a la escala que determinen los coeficientes de interacción a_{ij}.

Antes de abandonar el tema propongo una última revisión de la expresión

producción biológica$=A$. (covarianza)

y la introducción de los cambios en el tiempo

$$dP/dt=(dA/dt)\cdot(\text{cov.})+[d(\text{cov.})/dt]\cdot A$$

lo que ayudará a destacar algunas diferencias fundamentales entre los sistemas planctónicos y los terrestres. Los ecosistemas bentónicos comparten algunas de las propiedades de los terrestres. Los ecosistemas terrestres tienen una organización más rígida y los descensos del valor de la difusión turbulenta son menos importantes; de ahí que los descensos de la productividad a lo largo de la sucesión se hallen más relacionados con cambios de localización, crecimiento, movimiento y transporte por organismos. En los sistemas planctónicos, las consecuencias de la desviación de la energía hacia escalas menores de turbulencia son mucho más importantes; la covarianza de la distribución disminuye especialmente cuando el movimiento activo (y no coincidente) supera el transporte pasivo. (Ramón Margalef.)

La mecánica cuántica de los materiales

Las propiedades estructurales de los sólidos se pueden predecir mediante una teoría en la que los electrones se comportan como haces luminosos en una caja de espejos parcialmente plateados

Marvin L. Cohen, Volker Heine y James C. Phillips

Las propiedades de la materia vienen determinadas en última instancia por las leyes que rigen las interacciones entre los electrones y los núcleos atómicos. Estas partículas son los constituyentes básicos de la materia. Sus interacciones se rigen por las leyes de la mecánica cuántica. Estas leyes gobiernan las fuerzas de la atracción y repulsión electrostática e imponen ciertas restricciones entre los movimientos de las partículas. Sin embargo, hasta una fecha relativamente reciente, la idea de que las propiedades de los agregados de partículas se podían predecir a partir de tales leyes fundamentales era poco más que un simple reconocimiento filosófico del carácter fundamental de esas leyes. Con la excepción de algunos sistemas muy simples de electrones y núcleos atómicos, tales como el átomo de hidrógeno, no era posible deducir las propiedades de los agregados a partir de principios básicos. Como consecuencia, las aplicaciones de las leyes fundamentales de la física a las disciplinas que describen estados de la materia más complejos, tales como la química, la bioquímica, la metalurgia y la cerámica, han sido bastante limitadas.

En los últimos 25 años, los teóricos cuánticos que se han dedicado a estudiar los materiales sólidos han empezado a rellenar la laguna existente entre los principios básicos y las aplicaciones prácticas. Estos científicos han desarrollado nuevos métodos mecánico-cuánticos capaces de predecir la configuración de los electrones de valencia de un átomo o de un agregado de muchos átomos, para la región de energías de excitación en la que los átomos forman enlaces interatómicos. Los electrones de valencia de un átomo son los más externos, es decir, los menos fuertemente ligados; estos electrones son los que forman los enlaces químicos con otros átomos. En consecuencia, toda teoría que especifique la configuración de los electrones de valencia estará relacionada con las propiedades generales de la materia que dependen de la naturaleza de los enlaces interatómicos. Entre estas propiedades cabe señalar las de tipo electromagnético (por ejemplo, la conductividad eléctrica y la reflectividad óptica), las de tipo químico (así la capacidad de adsorber determinadas sustancias), las térmicas (tales como el calor específico) y las mecánicas (de las que son muestra la dureza, la maleabilidad y la elasticidad).

En el átomo de hidrógeno, la configuración del único electrón que posee (que es necesariamente un electrón de valencia) se puede calcular a partir de la energía potencial del electrón. En átomos más complejos se puede obtener también una expresión matemática para cada electrón de valencia, a partir de la cual se determina su configuración; esta expresión es una especie de energía potencial generalizada. Sin embargo, las teorías cuánticas han encontrado que no resulta práctico trabajar con expresiones para la energía potencial real de los electrones de valencia en átomos con más de dos electrones. La energía potencial real de un electrón de valencia debe tener en cuenta sus interacciones con los electrones más fuertemente ligados del átomo; a su vez, estas interacciones resultan gobernadas por la energía potencial real de cada uno de dichos electrones. En la actualidad se ha encontrado una forma de salir de este punto muerto, al advertir que no hay necesidad de tener en consideración la energía potencial real de todos los electrones si sólo se pretende obtener una configuración aproximada de los electrones de valencia; las interacciones entre los electrones más internos y los electrones de valencia de un átomo no producen efectos significativos en la corteza de dicho átomo. Por tanto, se puede suponer que los electrones más internos de un átomo y el correspondiente núcleo atómico constituyen una sola partícula sin estructura interna. Este método de trabajo se conoce con el nombre de teoría del pseudopotencial.

El número de electrones de valencia de un átomo es el principio que permite ordenar el sistema periódico de los elementos. Los químicos han reconocido durante algún tiempo que las configuraciones espaciales que poseen los electrones de valencia para diferentes niveles de energía determinan la naturaleza del enlace químico y con él las propiedades de una molécula o de una red cristalina. Desgraciadamente, las distorsiones en las órbitas de los electrones de valencia inducidas por las interacciones con los electrones de valencia próximos y con los electrones más internos de los átomos pueden llegar a ser bastante grandes. Por este motivo, las propiedades de una sustancia todavía no se pueden predecir por métodos mecánico-cuánticos, ni siquiera en el caso de moléculas relativamente sencillas.

Sin embargo, existe un campo en el que estas predicciones sí que son posibles: el de los sólidos cristalinos. La ordenación regular de los átomos en una red cristalina permite calcular las propiedades de un sólido macroscópico, constituido tal vez por 10^{23} átomos. En otras palabras, muchas de las propiedades de un sólido elemental como el plomo o un sólido binario simple como el arseniuro de galio se pueden deducir ahora por consideraciones energéticas, tomando como punto de partida la identidad de los átomos constituyentes y las condiciones externas de temperatura, presión y campo magnético. Estos avances teóricos tienen amplias repercusiones de tipo práctico en la

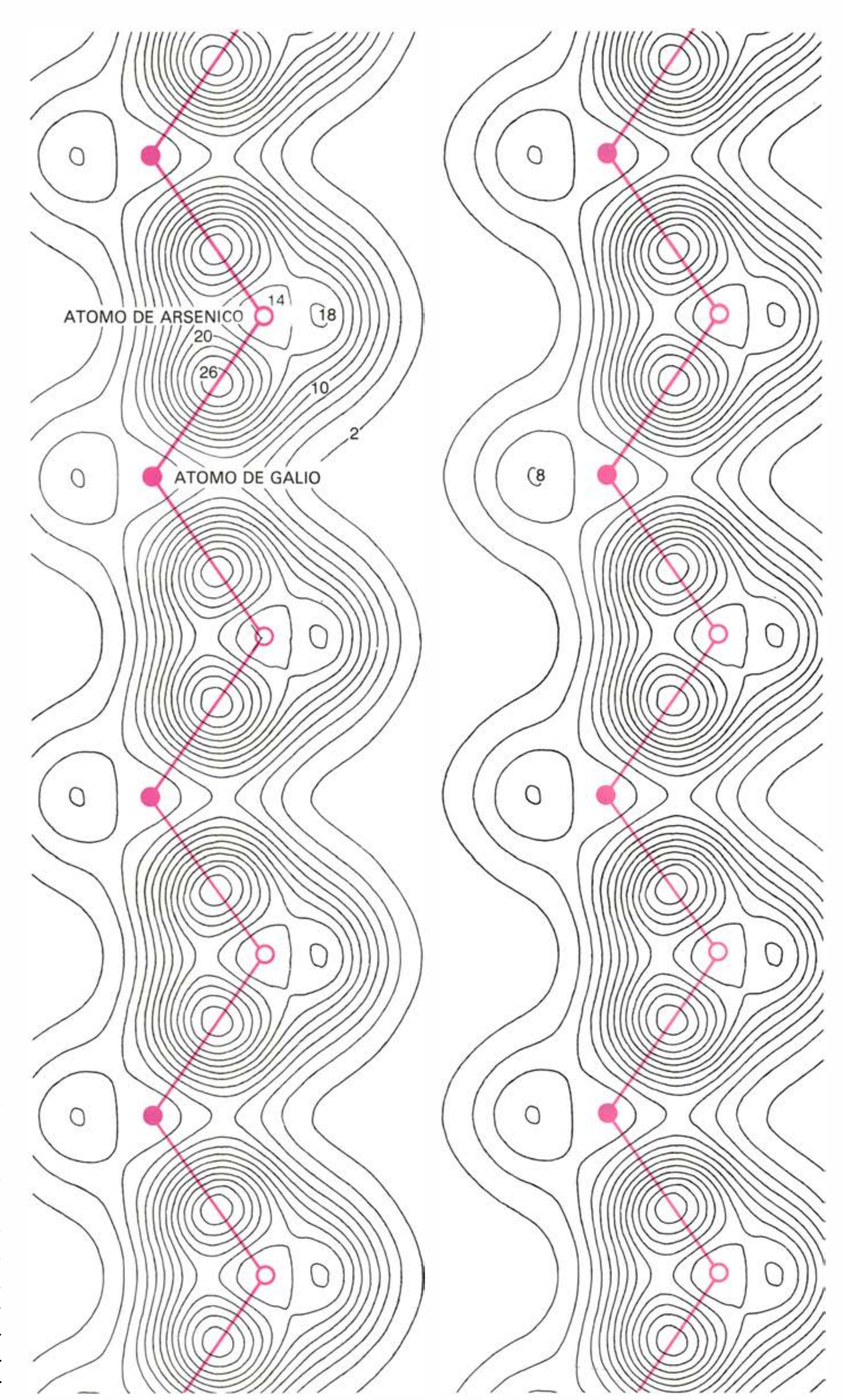
preparación de ciertos materiales cuyas propiedades, tales como la superconductividad, la semiconductividad o la reflectividad óptica, se pueden especificar con antelación.

La estrategia de cálculo primitiva

No resulta difícil comprender la razón por la que las leyes de la mecánica cuántica son difíciles de aplicar a las descripciones de la materia que proporcionan la química, la biología y otras disciplinas análogas. En parte, estas dificultades están originadas por el hecho de que la estructura electrónica de un sistema de 10^{23} partículas, aun en el caso de que dicho sistema presente una gran regularidad estructural, es enormemente compleja. Sin embargo, las primeras teorías cuánticas ya señalaron que el éxito de las predicciones de las propiedades de los sólidos dependía de la descripción mecánico-cuántica de los átomos aislados que lo constituían. Una consecuencia de esta idea fue la suposición de que la configuración de los electrones de valencia en un sólido se podía determinar, en primera aproximación, superponiendo las configuraciones de los electrones de valencia de los átomos aislados. Una vez determinada esta configuración superpuesta, se tienen que introducir las oportunas correcciones, con el fin de tomar en consideración las distorsiones de las órbitas de los electrones que producen los átomos vecinos.

La estrategia que acabamos de describir es análoga a la utilizada en la predicción del movimiento de un meteoroide en el sistema solar. La trayectoria de un meteoroide resulta totalmente determinada por la ley de gravitación de Newton. El cálculo de la trayectoria de un meteoroide sería tremendamente fácil si la única fuerza gravitacional resultante fuera la que existe entre el meteoroide y el Sol. Sin embargo, el movimiento del meteoroide resulta ligeramente perturbado por las interacciones con los planetas; por consiguiente, su trayectoria viene definida por otras fuerzas que cambian constantemente a medida que el meteoroide y los planetas se mueven.

El método convencional que se sigue para determinar la trayectoria de un meteoroide consiste en calcular, en primer lugar, la trayectoria que dicho cuerpo tendría en el caso de que sobre él actuara sólo la gravedad solar y, a continuación, evaluar la forma en que esta trayectoria se ve perturbada por la configuración existente de los planetas para pequeños intervalos de tiempo. La posición perturbada del meteoroide se



MAPA DE LA DENSIDAD DE CARGA de los electrones de valencia en cristal de arseniuro de galio. Pone de manifiesto la distribución de dichos electrones con una gran precisión. Los electrones de valencia son los electrones más externos de un átomo y los responsables del enlace químico. Las curvas de la figura representan las líneas de igual densidad de carga electrónica, en unidades arbitrarias; a lo largo de estas líneas, la probabilidad de encontrar a un electrón se mantiene constante. Cada uno de los átomos de galio de dicho cristal está situado en el centro de un tetraedro cuyos vértices están ocupados por átomos de arsénico; a su vez, cada átomo de arsénico se halla en el centro de un tetraedro cuyos vértices están ocupados por átomos de galio. (La correspondiente estructura tridimensional se representa en la figura de la parte inferior de la página 56.) El plano de la figura pasa por los centros de algunos de los átomos; los otros átomos a los que éstos se hallan engarzados se sitúan fuera del mapa. Los enlaces interatómicos situados en el plano del mapa se representan mediante líneas rectas. Los enlaces se caracterizan por una acumulación de la densidad de carga. Los mapas generados por ordenador se obtienen tras cálculos muy complejos; estos cálculos han sido posibles gracias a la teoría del pseudopotencial, que constituye un método de aplicación de los principios de la mecánica cuántica a los electrones de valencia de los sólidos. El conocimiento detallado de sólidos tales como el arseniuro de galio es muy importante tanto desde el punto de vista científico como tecnológico: este material se emplea mucho en el sector electrónico.

puede considerar entonces como un punto de una nueva órbita alrededor del Sol y, a continuación, se puede calcular la perturbación que sufre esta nueva órbita. Mediante este cálculo iterativo la trayectoria real del meteoroide se puede determinar con toda la precisión que se desee, dado que la aproximación converge a la trayectoria real. Sin embargo, para que este método funcione bien es necesario que la primera estimación de la órbita sea razonablemente buena. Este requisito refleja la intuición física de que la gravedad solar predomina sobre los restantes efectos en la órbita.

En el año 1930, muchos investigadores expresaron su optimismo acerca de que esta estrategia de cálculo conduciría rápidamente a la aplicación de la teoría cuántica a los agregados de materia de grandes dimensiones. Esta teoría ya había explicado con éxito la existencia de rayas en el espectro de radiación emitido por un gas atómico; tales rayas se forman cuando los electrones experimentan transiciones entre estados discretos de energía. La invención de la mecánica ondulatoria por Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg hizo posible predecir las propiedades de los átomos más simples, como el hidrógeno, y de las moléculas más simples, como la molécula diatómica de hidrógeno (H_2).

Ondas electrónicas

Poco tiempo después de que se alcanzaran estos éxitos, Erich Hückel, de la Universidad de Marburg, y Robert S. Mulliken, de la Universidad de Chi-

	Ia	IIa	Ib	IIb	III
PERIODO 2	LITIO Li 3 2s 1 INTERIOR 2			BERILIO Be 4 2s 2 INTERIOR 2	BORO B 5 2p 1 2s 2 INTERIOR 2
PERIODO 3	SODIO Na 11 3s 1 INTERIOR 10			MAGNESIO Mg 12 3s 2 INTERIOR 10	ALUMINIO Al 13 3p 1 3s 2 INTERIOR 10
PERIODO 4	POTASIO K 19 4s 1 INTERIOR 18	CALCIO Ca 20 4s 2 INTERIOR 18	COBRE Cu 29 4s 1 INTERIOR 28	ZINC Zn 30 4s 2 INTERIOR 28	GALIO Ga 31 4p 1 4s 2 INTERIOR 28
PERIODO 5	RUBIDIO Rb 37 5s 1 INTERIOR 36	ESTRONCIO Sr 38 5s 2 INTERIOR 36	PLATA Ag 47 5s 1 INTERIOR 46	CADMIO Cd 48 5s 2 INTERIOR 46	INDIO In 49 5p 1 5s 2 INTERIOR 46
PERIODO 6	CESIO Cs 55 6s 1 INTERIOR 54	BARIO Ba 56 6s 2 INTERIOR 54	ORO Au 79 6s 1 INTERIOR 78	MERCURIO Hg 80 6s 2 INTERIOR 78	TALIO Tl 81 6p 1 6s 2 INTERIOR 78

EL SISTEMA PERIODICO DE LOS ELEMENTOS proporciona una información adecuada acerca de la estructura de los electrones de valencia y de las capas más internas de los átomos para aquellos elementos cuyas propiedades repetitivas de valencia son más sencillas. Los niveles energéticos parcialmente ocupados por los electrones de valencia se representan en líneas coloreadas discontinuas. Los niveles energéticos totalmente ocupados por dichos electrones se representan mediante líneas coloreadas continuas. Finalmente, los niveles energéticos de los electrones de las capas más internas del átomo se representan mediante líneas negras continuas. El número de electrones existente en cada nivel de energía se indica junto a cada una de estas líneas; los

cago, llegaron a la conclusión de que el método de superposición de las configuraciones calculadas para átomos aislados proporciona una aceptable aproximación de la configuración de ciertas moléculas. Aplicaron este método a moléculas diatómicas más pesadas que el hidrógeno y a hidrocarburos de alto peso molecular. Muchos investigadores empezaron a pensar que pronto sería también posible predecir con éxito las propiedades de los sólidos a partir de la teoría cuántica. Sin embargo, a medida que transcurría el tiempo, todas estas esperanzas se vieron reemplazadas por un pesimismo generalizado.

En mecánica cuántica el movimiento de un electrón viene definido por un orbital, de la misma forma que la trayectoria de un meteoroide viene dada por su órbita. Ahora bien, un orbital no es una trayectoria, sino una distribución de probabilidad. Al predecir las propiedades de los agregados organizados de los electrones y los núcleos atómicos, a lo más que podemos aspirar es a determinar la probabilidad de que los electrones ocupen una cierta región del espacio. Dicha probabilidad se puede expresar en términos de densidad relativa de la carga electrónica.

Al calcular la distribución de probabilidad o densidad de carga de un electrón, es conveniente considerar a dicho electrón como una superposición de ondas y no como una partícula. La densidad de carga en una región dada es igual al cuadrado de la magnitud de un número complejo cuyo valor varía de un punto a otro del espacio. (Un número complejo tiene una parte real y una parte imaginaria; esta última es un múltiplo de la raíz cuadrada de -1. Si se representa un número complejo mediante un punto en un plano, de forma tal que el valor de la parte real se obtenga a lo largo del eje x y el valor de la parte imaginaria a lo largo del eje y, la magnitud del número complejo en cuestión vendrá dada por la distancia existente desde dicho punto hasta el origen de coordenadas.) La ecuación que genera el número complejo tiene la misma forma que la ecuación que nos da la amplitud de una onda. Puesto que la amplitud de la onda del electrón depende de la posición en el espacio, la expresión matemática que proporciona la amplitud de la onda del electrón a través del espacio se conoce con el nombre de función de onda del electrón.

La función de onda es una expresión matemática abstracta que no se puede medir directamente. Sin embargo, a partir de la función de onda se pueden deducir y estudiar empíricamente ciertas propiedades, así la densidad de carga. Por ejemplo, cuando dos ondas correspondientes a una función de onda electrónica se solapan en un punto del espacio, sus amplitudes se suman algebraicamente y la densidad de carga en dicho punto es igual al cuadrado de la suma de amplitudes resultante. La suma algebraica de amplitudes de onda se denomina interferencia. Si las dos funciones de onda se refuerzan mutuamente, el resultado es una interferencia constructiva; si tienden a anularse, el resultado es una interferencia destructiva.

Ondas estacionarias

Cuando una onda electrónica interacciona con un núcleo atómico, la onda se difunde, es decir, se refleja en todas direcciones, tal como sucede con una onda que se propaga en la superficie del agua al chocar con un obstáculo. La onda difundida interfiere con la onda incidente tanto en la dirección en que ésta avanza como en las otras direcciones. Esta interferencia crea una

IV	V	VI	VII
CARBONO C 6	NITROGENO N 7	OXIGENO O 8	FLUOR F 9
2*p* 2; 2*s* 2; INTERIOR 2	2*p* 3; 2*s* 2; INTERIOR 2	2*p* 4; 2*s* 2; INTERIOR 2	2*p* 5; 2*s* 2; INTERIOR 2
SILICIO Si 14	FOSFORO P 15	AZUFRE S 16	CLORO Cl 17
3*p* 2; 3*s* 2; INTERIOR 10	3*p* 3; 3*s* 2; INTERIOR 10	3*p* 4; 3*s* 2; INTERIOR 10	3*p* 5; 3*s* 2; INTERIOR 10
GERMANIO Ge 32	ARSENICO As 33	SELENIO Se 34	BROMO Br 35
4*p* 2; 4*s* 2; INTERIOR 28	4*p* 3; 4*s* 2; INTERIOR 28	4*p* 4; 4*s* 2; INTERIOR 28	4*p* 5; 4*s* 2; INTERIOR 28
ESTAÑO Sn 50	ANTIMONIO Sb 51	TELURO Te 52	IODO I 53
5*p* 2; 5*s* 2; INTERIOR 46	5*p* 3; 5*s* 2; INTERIOR 46	5*p* 4; 5*s* 2; INTERIOR 46	5*p* 5; 5*s* 2; INTERIOR 46
PLOMO Pb 82	BISMUTO Bi 83	POLONIO Po 84	ASTATO At 85
6*p* 2; 6*s* 2; INTERIOR 78	6*p* 3; 6*s* 2; INTERIOR 78	6*p* 4; 6*s* 2; INTERIOR 78	6*p* 5; 6*s* 2; INTERIOR 78

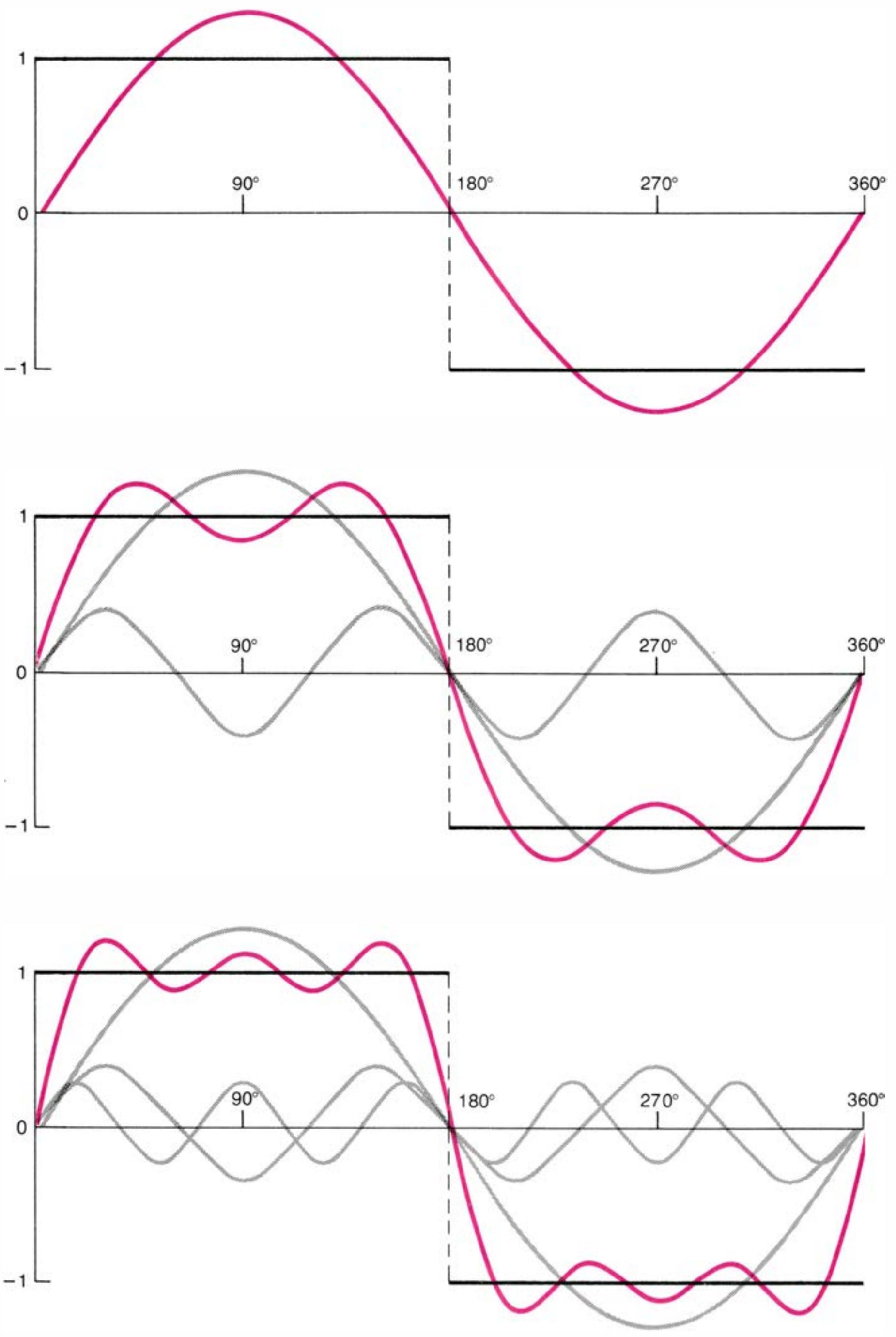
símbolos que aparecen a la izquierda son los nombres con que se suelen representar los respectivos orbitales atómicos. El número que aparece en el ángulo superior derecho de cada recuadro es el número atómico del elemento y la abreviatura del ángulo superior izquierdo es su símbolo químico. Dado que las configuraciones de los electrones de valencia de todos los elementos que constituyen una determinada columna del sistema periódico son similares, las propiedades químicas de los elementos lo serán también.

serie de nodos en los que la onda se anula, alternando con otras regiones en las que la onda resulta reforzada. En algunos casos se obtiene una onda estacionaria semejante a la que se produce en una cuerda vibrante. Si la onda electrónica se encuentra con dos o más núcleos atómicos, la onda resulta difundida por cada uno de dichos núcleos y la figura de interferencia resultante viene dada por la suma algebraica de las amplitudes de la onda incidente y de todas las ondas difundidas para cada punto del espacio.

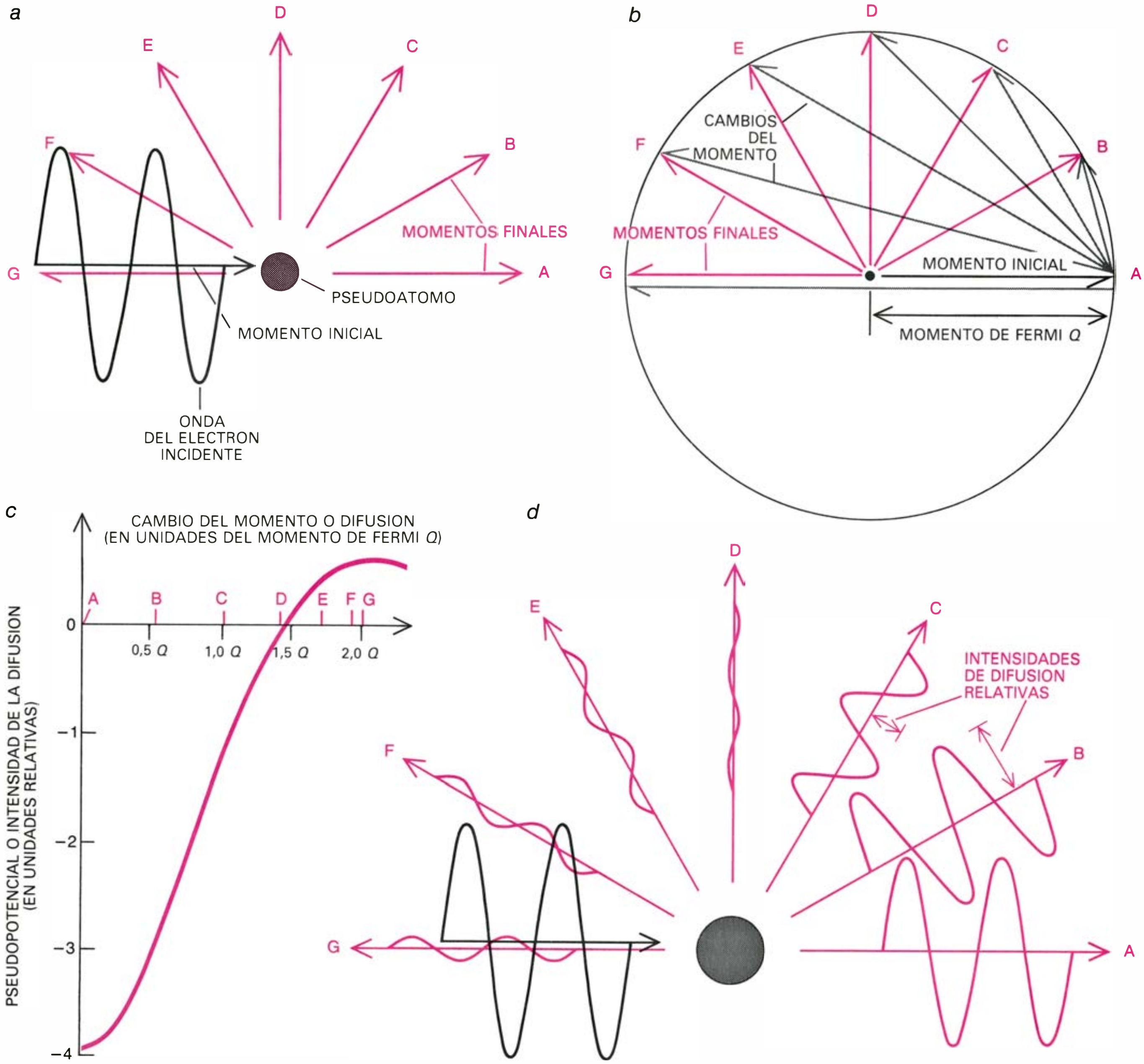
En el caso general, con muchos núcleos atómicos distribuidos al azar, podemos asimilar la figura de interferencia resultante a la superficie caótica de un mar tempestuoso. Ahora bien, si los átomos se distribuyen en formas geométricas sencillas, las figuras de interferencia resultantes pueden llegar a ser relativamente simples. Por ejemplo, en la difusión de una onda electrónica plana por un plano de átomos (en la que las crestas y los valles se distribuyen según líneas paralelas entre sí) se obtiene una figura de interferencia que está constituida por dos ondas planas: una se transmite a través del plano de átomos en la dirección en que avanza la onda original y la otra se refleja por el plano de átomos, de la misma forma en que la luz se refleja por un espejo. En todas las demás direcciones las ondas difundidas interfieren destructivamente y la amplitud resultante vale cero. En una red cristalina, en la que la disposición regular de los núcleos atómicos genera planos de átomos en varias direcciones del espacio, una onda resultará transmitida y reflejada como si se tratara de un rayo luminoso en un recinto cubierto por una serie de espejos semiplateados. En los límites de la red, de donde la carga electrónica no puede escapar, el plano de átomos se comporta como un espejo completamente plateado, en el que se produce la reflexión total de la onda hacia el interior del cristal.

La función de onda del electrón es de tipo estacionario y la figura de interferencia resultante es una consecuencia de la difusión, la reflexión y la transmisión de la onda del electrón en un medio atómico determinado. La función de onda depende también de la energía del electrón: en general, cuanto mayor es la energía del electrón mayor es el número de oscilaciones de la onda por unidad de tiempo. Cuando existe un segundo electrón en una región dada del espacio, se generan también ondas estacionarias.

Las ondas estacionarias determinan la forma en que la densidad de carga de un electrón individual varía en una cierta región del espacio. La densidad de carga total en una región es igual a la suma de las densidades de carga de todos los electrones presentes. El objetivo fundamental de todo análisis mecánico-cuántico de esta cuestión estriba en encontrar, para una disposición dada de núcleos atómicos, la onda estacionaria de menor energía que resulta de la interacción de la densidad de carga de cada uno de los electrones de una estructura con los núcleos atómicos y con las densidades de carga de los restantes electrones presentes en la misma. Esta descripción de un sistema de electrones y núcleos viene dada por la solución de una expresión matemática



PERMITE EL ANALISIS DE FOURIER obtener la forma aproximada de cualquier onda superponiendo una serie de ondas seno y coseno de amplitudes y frecuencias diferentes. En la teoría del pseudopotencial las ondas del electrón se representan mediante sus componentes de Fourier (ondas seno y coseno) debido a la simplicidad que supone el tratamiento de ondas de Fourier con un ordenador. Aquí, la onda cuadrada a analizar se representa en negro; las ondas seno que aparecen en gris en las dos figuras inferiores son las componentes de Fourier a partir de las cuales se construye la correspondiente aproximación de la onda cuadrada. Las curvas de color se obtienen sumando las amplitudes de todas las componentes de Fourier para cada punto; los tres diagramas muestran la forma en que las tres primeras etapas de la aproximación de Fourier convergen en la forma de la onda cuadrada. (La onda representada en color en el diagrama superior es la componente de Fourier que corresponde a una aproximación de primer orden.) En la práctica, para describir la onda de un electrón, se usan desde 4 hasta 1000 ondas seno y coseno.



PODEMOS INTERPRETAR EL PSEUDOPOTENCIAL como la intensidad de difusión neta de un átomo sobre un cristal. El pseudopotencial representa la efectividad del átomo para transformar el momento de uno de los componentes de Fourier de la onda de un electrón en un determinado momento final. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, el momento de una onda depende de su dirección de propagación y del número de oscilaciones de la onda por unidad de longitud. Para bajas energías, los únicos cambios significativos que se pueden originar en el momento de la onda de un electrón se producen en la dirección de la onda (*a*). Debido a las restricciones mecánico-cuánticas acerca de los estados permitidos del momento de un electrón, los momentos inicial y final de las ondas difundidas son aproximadamente iguales en magnitud (aunque no en dirección) a una cantidad conocida como momento de Fermi del sólido considerado. Si los momentos de la onda incidente (*flecha negra*) y de las ondas difundidas (*flechas coloreadas*) se representan en forma de vectores con un origen común (*b*), el cambio de momento producido por la difusión vendrá dado por la diferencia entre los vectores correspondientes al momento incidente y al momento difundido (*flechas grises*). El valor del pseudopotencial depende únicamente del cambio producido en el momento de la onda del electrón; en consecuencia, dicha magnitud podrá representarse en función de la longitud de las flechas grises. En la figura (*c*) se ilustra el pseudopotencial o la intensidad de difusión correspondiente al aluminio. La intensidad de difusión expresa la relación que media entre la amplitud de la onda difundida y la amplitud de la onda incidente. En consecuencia, las amplitudes relativas de los diferentes componentes de la onda difundida para el aluminio se pueden determinar con la ayuda de esta gráfica; en la figura (*d*) se presentan las ondas difundidas en las diferentes direcciones del espacio.

conocida como ecuación de Schrödinger.

Primeras dificultades de cálculo

Cuando se busca una solución de la ecuación de ondas correspondiente a un sistema físico con más de un átomo o más de un electrón, la interferencia de las ondas electrónicas imposibilita expresar las oportunas funciones de onda en términos matemáticos sencillos. En general, las amplitudes que se obtienen por una simple superposición de las funciones de onda de los átomos aislados son sólo una pobre aproximación a la realidad. Cuando los investigadores intentaron utilizar esta aproximación como un primer paso en un cálculo de perturbaciones similar al que se utiliza para calcular la órbita de un meteoroide, encontraron que, en el caso de los sólidos, las iteraciones convergen demasiado lentamente; como consecuencia de este hecho, el método citado sólo tiene un valor cualitativo. De aquí que, con la excepción del trabajo de Hückel y Mulliken sobre ciertas moléculas concretas, los primeros intentos que se llevaron a cabo para interpretar las propiedades de la materia resolviendo la ecuación de ondas condujeron a resultados muy pobres.

La decisión de empezar con átomos aislados, en la creencia de que las funciones de onda de los electrones de un sólido o de una molécula podrían calcularse como simples perturbaciones, fue una de las causas que impidieron el progreso en esta línea de trabajo. Otra dificultad estaba motivada por la práctica de considerar a todos los electrones de cada átomo de dentro afuera. Las primeras funciones de onda que se calcularon fueron las correspondientes a los electrones más internos, es decir, los de energía más baja. Las funciones de onda de los electrones de energía más alta y, en última instancia, las de los electrones de valencia, se calcularon tomando en consideración los efectos de interferencia de todos los electrones de energías más bajas cuyas funciones de onda ya se habían computado. Cuando se calculan de este modo, las funciones de onda de los electrones de energías más altas dependen sensiblemente de los valores de las funciones de onda obtenidos previamente. En consecuencia, los pequeños errores cometidos en la descripción de los electrones más internos pueden dar lugar a enormes variaciones en las configuraciones predichas para los electrones de valencia. Por ejemplo, en los cálculos relativos al átomo de plomo, que tiene 82 electrones, el riesgo de cometer estos errores acumulados es considerable.

Uno de los investigadores que perseveró más en esta línea de trabajo fue Douglas R. Hartree, de la Universidad de Cambridge. Utilizó una simple máquina de calcular de sobremesa para determinar los valores numéricos de las funciones de onda electrónicas de los átomos aislados de los 29 elementos más ligeros del sistema periódico. A medida que iba obteniendo los primeros resultados de estos trabajos, Hartree encontró que la evaluación de la función de onda en cada punto del espacio era un problema relativamente simple. La parte más importante de sus cálculos consistía en la presentación de sus resultados numéricos en una forma tal que subrayara su significado físico. Aunque la precisión de todos estos cálculos es elevada, los datos que se refieren a los enlaces interatómicos se deben distinguir de los datos relativos a las capas más internas del átomo, mucho más abundantes que los anteriores, y que son irrelevantes en relación con el tipo de enlace químico que se forma. El problema de lo que podríamos denominar ruido numérico crece en proporciones alucinantes en los cálculos realizados con los modernos ordenadores. De este modo, paradójicamente, a medida que aumentan las posibilidades que ofrece un ordenador se hace necesario conocer mejor los procesos físicos pertinentes.

En los primeros cálculos basados en la aplicación de la mecánica cuántica a los sólidos se pusieron de manifiesto tres tipos diferentes de dificultades: las que se referían a los átomos aislados, las relacionadas con la práctica de calcular las funciones de onda de los electrones de dentro afuera y los problemas de discernir los procesos físicamente importantes del denominado ruido numérico. Todos estos problemas salieron a flote con toda intensidad a través de la incapacidad de los primitivos cálculos de la mecánica cuántica para dar cuenta de descubrimientos importantes de la química estructural.

Longitud del enlace químico

Uno de los fallos de los métodos primitivos consistía en la predicción de la longitud de los enlaces químicos, es decir, la distancia entre dos núcleos atómicos en un sólido o una molécula. Linus Pauling, del Instituto de Tecnología de California, y otros químicos estructurales demostraron que aunque la longitud de los enlaces se mantuviera aproximadamente constante de una sustancia a otra, ciertas diferencias significativas en la estructura química podrían asociarse con diferencias pequeñas en la longitud de dichos enlaces.

En el caso del diamante, un material constituido por carbono puro, la longitud de los enlaces entre dos átomos de carbono es la misma que en el etano (CH_3-CH_3); en ambas sustancias cada uno de los átomos de carbono está rodeado por otros cuatro átomos de ese mismo elemento, uno por cada vértice de un tetraedro. Sin embargo, en el etileno ($CH_2 = CH_2$) el enlace carbono-carbono es sensiblemente más corto que el anterior, presumiblemente porque en este caso cada átomo de carbono está ligado sólo a otros tres átomos (obsérvese que los dos átomos de carbono del etileno están unidos por un doble enlace). Por otra parte, el enlace carbono-carbono en el grafito, otro material constituido por carbono puro, tiene una longitud diferente de la que ofrecen los anteriores, a pesar de que, como sucede en el etileno, cada uno de los átomos de carbono está enlazado a los tres átomos más próximos. Todas estas diferencias son una consecuencia de la interacción de las respectivas funciones de onda electrónicas y de su tendencia a adoptar la onda estacionaria menos energética que sea compatible con las leyes de la mecánica cuántica.

Las diferencias estructurales que se ponen de manifiesto en aquellos materiales que están constituidos por la misma clase de átomos, tal como sucede en el caso del diamante y del grafito, se conocen con el nombre de diferencias de fase. Las diferencias de fase corresponden a energías totales del sólido ligeramente diferentes. El estudio de las diferencias de fase de materiales muy diversos ha puesto de manifiesto que la discrepancia entre las energías de dos estructuras sólidas similares es del orden de 0,1 electronvolt por cada electrón de valencia. A título ilustrativo, podemos señalar que estas diferencias de energía son del orden de la décima parte de la energía de enlace del electrón en el átomo de hidrógeno, cifrada en torno al electronvolt.

Aun cuando las diferencias de energía entre dos fases sólidas semejantes son pequeñas, suelen corresponder a ciertas diferencias en la estructura interatómica. Las diferencias estructurales determinan algunas de las propiedades más importantes del sólido, como por ejemplo la conductividad eléctrica, señalando si es un metal, un semiconductor o un aislante.

Los cálculos de los primeros teóricos cuánticos eran incapaces de poner de manifiesto las diferencias existentes entre las fases conductora, semiconductora y aislante de los sólidos. La precisión de estos cálculos apenas permitía predecir cuándo empieza a evolucionar hacia el estado sólido un grupo de átomos aislados de un gas. Si dos soluciones cualesquiera de la ecuación de ondas cuyas energías totales diferían en menos de medio electronvolt por electrón de valencia, resultaban indistinguibles a la luz de los primitivos métodos mecánico-cuánticos. El fracaso de tales métodos para resolver las diferencias de energías que correspondían a las transiciones de fase más importantes en los sólidos hizo pensar que las perspectivas de aplicación de la teoría cuántica a los sólidos eran bastante sombrías.

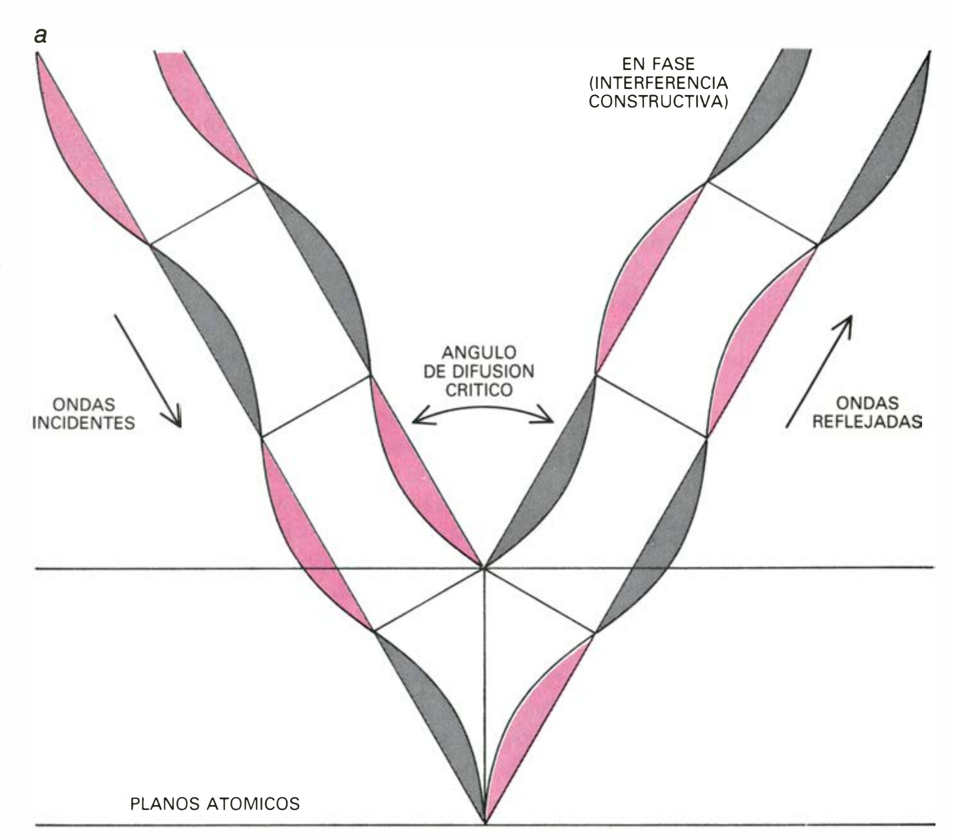
Poder de resolución del cálculo cuántico

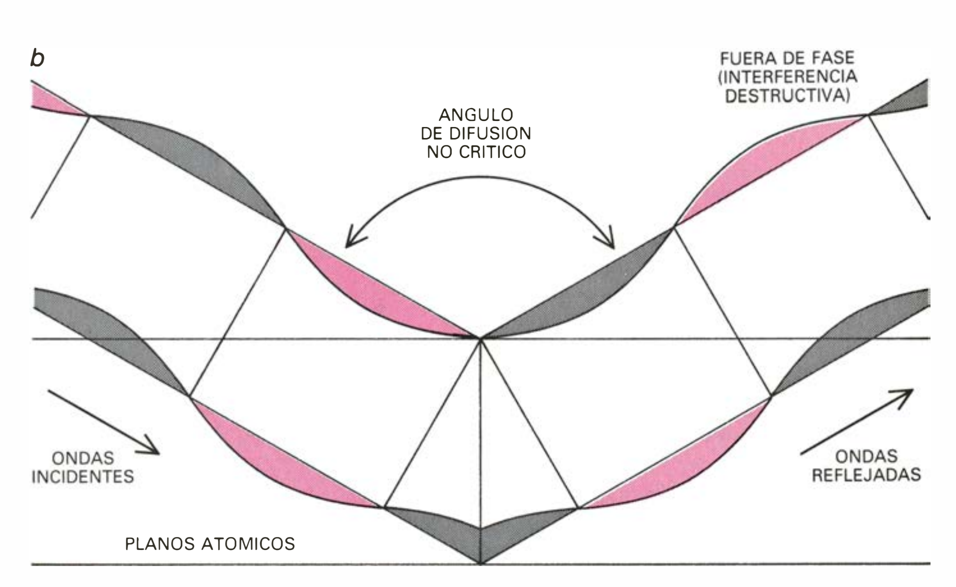
¿Cómo hemos de llevar a cabo los cálculos cuánticos para diferenciar entre las distintas estructuras alternativas que determinan las propiedades químicas? A esta pregunta se responde realizando dichos cálculos en una forma tal que se pongan claramente de manifiesto las diferencias de energía y las interacciones químicas que se desea investigar. Al proceder así podemos vernos obligados a abandonar las ventajas que ofrece un cálculo exhaustivo. Se hace necesario elegir entre una visión gene-

ral del sistema, en la cual los detalles finos se pierden, o un examen más de cerca, en el que los hechos a gran escala pasan a ocupar un segundo lugar.

Uno de los mejores métodos para aumentar el poder de resolución de los cálculos cuánticos, en relación con las diferencias de energía por las que estamos interesados, se basa en permitir que dichos cálculos estén gobernados por el sistema periódico. Cuando las primeras teorías cuánticas procedieron a resolver la ecuación de onda de átomos aislados consideraron a cada elemento por separado. Sin embargo, de acuerdo con el sistema periódico, para los átomos más ligeros las propiedades químicas de un elemento cuyo núcleo atómico es A son similares a las propiedades del elemento cuyo número atómico es $A + 8$. (En el caso de átomos más pesados se presentan regularidades análogas a ésta, aunque con una periodicidad más compleja.) La razón de tales similaridades estriba en que el número de electrones de valencia en dos de tales átomos es el mismo y que las propiedades químicas de un elemento dado dependen casi totalmente del número de electrones de valencia. Los electrones más internos de un átomo están tan fuertemente enlazados al núcleo que se puede considerar, en su conjunto, que constituyen una estructura inerte. Por otra parte, la carga negativa de los electrones de esta estructura neutralizan o apantallan parte de la carga positiva del núcleo. Dado que los cálculos cuánticos son muy sensibles a los niveles de energía que nos interesan en química, todos estos hechos deben ser tenidos en cuenta desde el principio.

En el año 1939, W. Conyers Herring, de la Universidad de Princeton, descubrió la forma en que los efectos originados por las capas más internas del átomo se podían minimizar. Herring observó que la función de onda de un electrón de valencia debía tener un nodo, o punto en el que se anulaba, más que la función de onda del electrón más externo de la estructura interna. El nodo adicional se sitúa cerca de la región en la que la función de onda del electrón más externo de dicha estructura inerte tiene un valor máximo. En otras palabras, la amplitud de la función de onda del electrón de valencia es aproximadamente igual a cero en la superficie de esa estructura y, por tanto, el cuadrado de dicha amplitud, es decir, la probabilidad de encontrar al electrón en esa región, es también prácticamente nula. En consecuencia, el electrón de valencia tiende a evitar la superficie de la estructura más interna de un átomo.





LA DIFRACCION DE BRAGG consiste en la difusión de las ondas por los planos paralelos de átomos de un cristal. Cuando la onda de un electrón interacciona con un plano atómico, una parte de la onda se refleja y la otra parte se transmite. En consecuencia, cuando una onda incide sobre un conjunto de planos paralelos de átomos se puede reflejar en más de una dirección. Cuando la dirección y la longitud de onda de una onda incidente y el espacio entre los sucesivos planos atómicos son tales que los caminos recorridos difieren en un número entero de longitudes de onda, las ondas emergentes interfieren constructivamente (*a*). Para otros ángulos de incidencia la interferencia se denomina destructiva y las amplitudes de las ondas emergentes se anulan (*b*). La difusión de ondas electrónicas por un cristal es más simple que la difusión de ondas por un átomo individual, dado que en este caso se produce una difusión de la onda en todas direcciones. El pseudopotencial necesita ser evaluado sólo para los ángulos de difusión críticos.

¿En qué cuantía se modifican los niveles energéticos de los electrones de valencia como consecuencia de la alteración que sufre la función de onda de dichos electrones en las regiones más internas del átomo? En la búsqueda de una respuesta a esta pregunta, la contribución de Herring fue crucial. Como resultado de sus cálculos numéricos, este autor observó que la oscilación adicional de la función de onda de un electrón de valencia, asociada con un nodo extra, supone que dicho electrón de valencia posee una energía cinética superior a la normal cuando se encuentra en la región más interna del átomo. Esta

energía cinética adicional (siempre positiva) resulta cancelada, casi exactamente, por el aumento que experimenta la energía potencial negativa de dicho electrón cuando se aproxima al núcleo y penetra en la región más interna del átomo. De aquí se desprende la conclusión de que el tamaño de esa región carece prácticamente de importancia en relación con la energía que posee el electrón de valencia fuera de la misma, dado que su energía total en su interior es siempre muy próxima a cero.

Energía en la región más interna del átomo

En 1939 Herring consiguió explicar la razón por la cual el berilio sólido, que tiene un total de cuatro electrones (incluyendo dos electrones de valencia), se comporta como un metal compacto. Nueve años más tarde, el propio Herring y Frank Herman, de la Universidad de Columbia, estudiaron la estructura del diamante resolviendo la correspondiente ecuación de onda; estos cálculos se llevaron a cabo con la ayuda de un primitivo ordenador digital. Por otra parte, el método de Herring fracasó por completo cuando se utilizó para intentar resolver las diferencias entre los niveles energéticos del carbono, el silicio y el germanio; estos tres elementos ocupan la misma columna del sistema periódico.

Desde una perspectiva actual, resulta fácil asociar todas estas dificultades con el método utilizado en la resolución de la ecuación de onda de un átomo aislado desde los electrones más internos hasta los más exteriores. En el caso de los átomos más pesados, la utilización de este método oscurece la simplicidad que caracteriza al sistema periódico de los elementos. Sin embargo, durante los años 1957 a 1966, un grupo internacional de teóricos del estado sólido desarrolló nuevos métodos capaces de incorporar las ideas de Herring acerca de la cancelación de energías de los electrones de valencia, evitando al mismo tiempo muchas de sus dificultades conceptuales y de cálculo. Estos métodos constituyen la base de la teoría del pseudopotencial. El citado grupo incluía a G. Franco Bassani, de la Universidad de Roma, Morrell H. Cohen, de la Universidad de Chicago, Walter A. Harrison, de la Universidad de Stanford, John M. Ziman, de la Universidad de Bristol, y los autores de este artículo, entre muchos otros.

En lugar de defender sus métodos sobre bases puramente teóricas, la nueva generación de investigadores centró sus esfuerzos en la comparación de las predicciones de la teoría con la experiencia, en un intervalo tan amplio como fuera posible. Tales comparaciones suelen ser tan difíciles que, en principio, el grupo sólo esperaba alcanzar un éxito modesto. Sorprendentemente estos autores se encontraron con una situación bastante insólita en la ciencia: la teoría avanzó de éxito en éxito prácticamente sin esfuerzo alguno. Los nuevos métodos consiguieron solucionar todos los problemas que las teorías precedentes no habían sido capaces de resolver e incluso predijeron ciertos hechos relacionados con la estructura cuántica de los sólidos, mucho antes de que se estudiaran experimentalmente. Las confirmaciones experimentales de la teoría desempeñaron un papel decisivo en el desarrollo de la oportuna metodología. En 1970 la teoría del pseudopotencial gozaba ya de una aceptación casi universal y en la actualidad es prácticamente la única teoría válida que existe en relación con la estructura cuántica de los sólidos.

El pseudopotencial

El nuevo grupo de científicos fue uno de los primeros que preparó sus cálculos de forma tal que hicieran posible una utilización óptima de los modernos ordenadores electrónicos. Su estrategia de cálculo consistía en combinar y modificar las funciones de onda de los electrones de valencia directamente y, al mismo tiempo, descartar sistemática y coherentemente la existencia de las capas más internas de los átomos. Estos autores encontraron que las conclusiones de Herring, en relación con la cancelación de energías en la región más interna de los átomos, se aplican mejor si se introducen desde el principio y no en forma secuencial en el cálculo de las correspondientes funciones de onda. La nueva estrategia considera que un electrón de valencia se mueve bajo la influencia de un "pseudoátomo" cuya carga positiva es pequeña en comparación con la carga nuclear. La carga del pseudoátomo es igual a la carga neta que posee el núcleo después de sustraer la carga negativa de los electrones existentes en las capas más internas del átomo considerado.

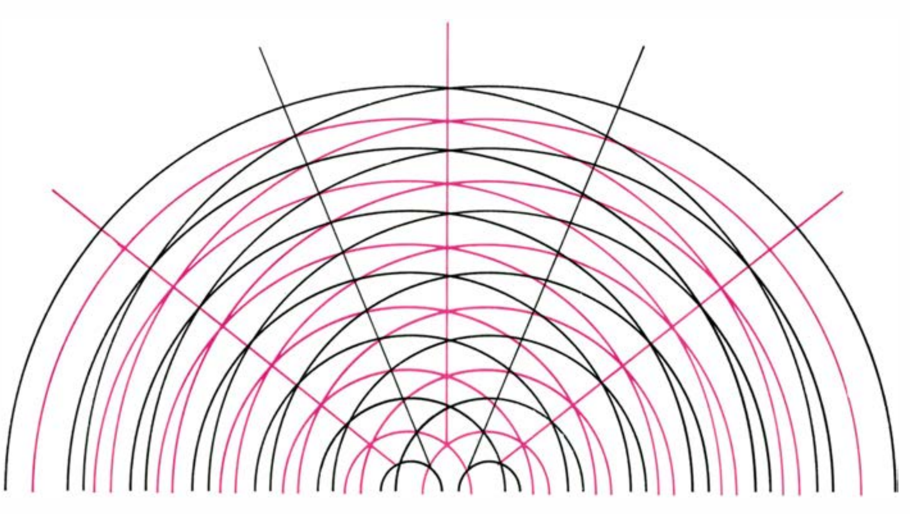
Desde el punto de vista matemático, cuando se trabaja con un ordenador digital, resulta conveniente determinar la función de onda de un electrón considerando la forma en que varía el momento de la onda del electrón al ser difundida por un pseudoátomo. En física

INTENSIDAD DE DIFUSION de los átomos de silicio en estado gaseoso (*curva de color*) comparada con la intensidad que corresponde al caso en que estos mismos átomos se encuentran en estado sólido (*puntos negros*). Los cambios de momento q_1, q_2 y q_3 están originados por la difracción de las ondas del electrón por tres conjuntos de planos de átomos paralelos en la correspondiente red cristalina. Las diferencias existentes entre la intensidad de difusión del gas y del sólido se deben a la redistribución de la carga de valencia que tiene lugar cuando los átomos de este elemento se reúnen para constituir un sólido.

clásica, el momento de una partícula es igual al producto de su masa por su velocidad; la idea de que se pueda definir un concepto análogo a éste para una onda puede parecer extraña. Sin embargo, en mecánica cuántica el momento de una onda viene dado por la dirección en que se mueve la onda y por el número de ondas, es decir, el número de oscilaciones por unidad de longitud.

En la práctica, la difusión de un electrón se puede describir en términos de la difusión de cada una de sus ondas individuales o componentes de Fourier. En virtud de un teorema demostrado por primera vez por el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier, la forma de una función periódica se puede obtener superponiendo un conjunto adecuado de ondas sencillas sinusoidales y cosenoidales de diferentes amplitudes y frecuencias [*véase la ilustración de la página 48*]. Recíprocamente, cualquier onda por complicada que sea puede resolverse en una serie de componentes seno y coseno. A continuación, se pueden realizar diferentes operaciones matemáticas sobre tales componentes y, finalmente, los nuevos componentes se pueden reunir de nuevo para sintetizar una nueva onda. La forma de esta última onda puede llegar a ser muy difícil de expresar matemáticamente si utilizamos cualquier otro método distinto del que acabamos de exponer.

A menos que una componente de Fourier determinada se difunda totalmente en una dirección dada, la conservación de la carga exige que la amplitud de la onda difundida sea menor que la de la onda incidente. La relación entre la amplitud de la onda difundida y la amplitud de la onda incidente se denomina intensidad de difusión. La magnitud utilizada actualmente por los teóricos cuánticos para resolver la ecuación de ondas mide la intensidad de difusión de las capas más internas de un átomo respecto a una componente de Fourier determinada de la onda correspondiente a un electrón de valencia. Esta magnitud es el pseudopotencial del electrón.



LAS SOLUCIONES DE LA ECUACION DE ONDAS que describe el movimiento de los electrones de un sólido pueden ser ondas estacionarias, es decir, ondas que persisten en el transcurso del tiempo. Cualquier cálculo de estas ondas estacionarias debe tener en cuenta los efectos de las interferencias de las ondas. Si consideramos una superficie bidimensional en la que no se produce ninguna reflexión, la propagación de dos ondas esféricas que parten de sendos focos puntuales da lugar a la producción de interferencias. En las regiones donde las crestas coinciden con las crestas (*curvas coloreadas*) y los valles coinciden con los valles (*curvas negras*), la interferencia es constructiva (*líneas de color*). Allí donde las crestas coinciden con los valles la interferencia es destructiva (*líneas negras*). Las propiedades fundamentales de un sólido se pueden predecir a partir de ciertas consideraciones basadas en las ondas estacionarias.

El momento de Fermi

En principio, pudiera parecer que la intensidad de difusión y el pseudopotencial deberían depender del momento de la onda incidente y de la onda difundida del electrón considerado. Si estas ondas fueran clásicas (es decir, no mecánico-cuánticas) o si la energía de los electrones fuera elevada, éste sería el caso. Sin embargo, la naturaleza cuántica del sistema y el nivel relativamente bajo de excitación de los sólidos reduce considerablemente la cantidad de información que se necesita para describir la difusión de los electrones de valencia por pseudoátomos.

De acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg, la posición y el momento de una partícula no se pueden determinar simultáneamente con precisión absoluta. Cuanto mayor es la precisión con que se conoce la posición de una partícula más incierto es su momento y viceversa. Cuando los electrones de valencia se encierran en un volumen finito, como lo están en un sólido, se puede evaluar su densidad media y, en consecuencia, podemos suponer que cada electrón está confinado en un volumen determinado de tamaño conocido. De este modo, el principio de incertidumbre permite estimar la incertidumbre en el momento de cualquier electrón del sólido: el valor de dicho momento está comprendido entre cero y cierto valor máximo conocido como momento de Fermi.

Las ondas de los electrones están sujetas también a otra restricción mecánico-cuántica: el principio de exclusión de Pauli. Este principio establece que, a lo sumo, sólo dos electrones de un sistema dado pueden tener exactamente el mismo momento. Por otra parte, los momentos de los electrones están cuantizados: únicamente son posibles ciertos valores discretos. Por consiguiente, cuando los electrones están encerrados en un volumen dado, sus momentos adquieren una serie de valores comprendidos entre dos valores extremos, correspondientes al estado fundamental y al momento de Fermi, respectivamente. En general, no es posible conocer cuánto vale el momento de un electrón en particular. Si dicho momento se conociera con toda precisión, la incertidumbre de su posición sería máxima, es decir, el electrón podría estar en cualquier lugar del espacio.

Sin embargo, aun cuando no se conozcan los estados ocupados por los electrones individuales, se puede demostrar que la difusión de la onda de un electrón por un pseudoátomo es un suceso relativamente raro. Supongamos que los electrones de valencia están confinados en un recinto cuyo tamaño coincide con el del sólido y que los pseudoátomos se han extraído de dicho recinto. Los momentos de los electrones se distribuirían entre los diferentes valores posibles existentes entre el estado fundamental y el momento de Fermi, pero las ondas de los electrones no serían difundidas por ningún átomo.

Supongamos ahora que los pseudoátomos se introducen de nuevo en el recinto. Las ondas de los electrones se difunden en los pseudoátomos y las ondas estacionarias resultantes son tales que la energía del sistema en la nueva configuración es mínima. Sin embargo, la difusión de una onda electrónica cambia su dirección y, en consecuencia, el momento del electrón se modifica. Puesto que todos los estados existentes entre el estado fundamental y el momento de Fermi están ocupados, la única forma de conseguir que el momento de la onda del electrón en cuestión pueda cambiar consiste en que tenga lugar

una transición desde un estado ocupado situado por debajo del momento de Fermi hasta un estado libre situado por encima del momento de Fermi.

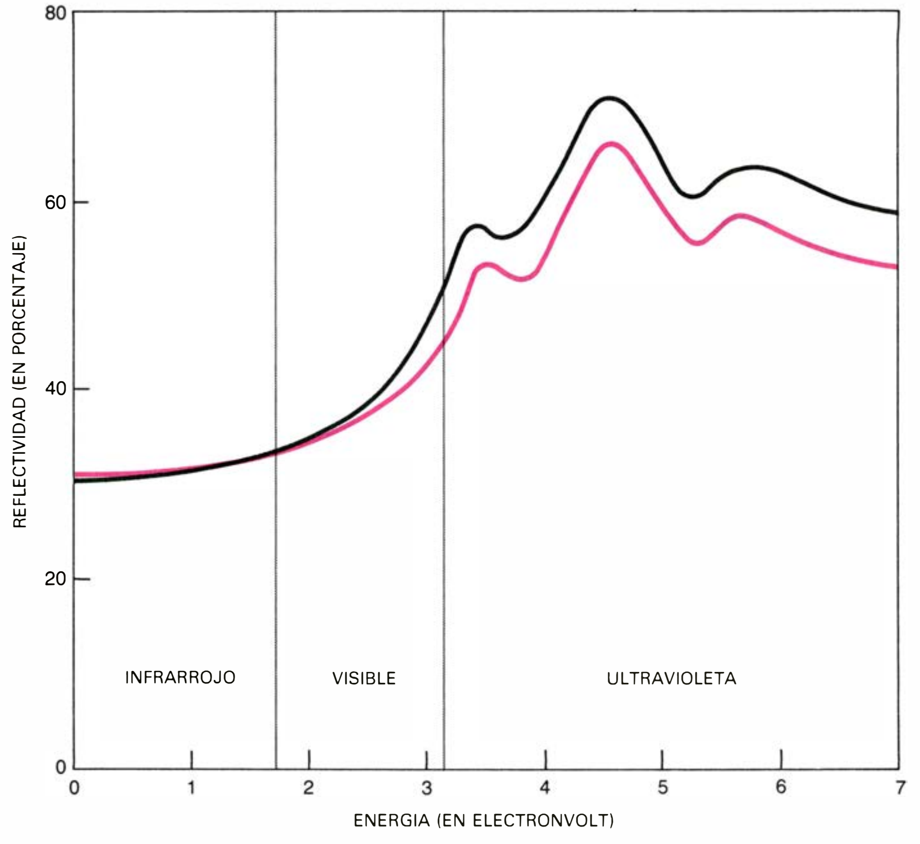
Cambio de momento cuantizado

La magnitud del momento de un electrón en un sólido sólo puede cambiar ligeramente como consecuencia de una difusión: fuera de los límites del pseudoátomo, la dirección de la onda del electrón puede resultar considerablemente alterada, aunque el número de oscilaciones por unidad de longitud varíe muy poco. En consecuencia, los únicos cambios de momento que resultan significativos en una difusión fuera de las capas más internas del átomo son relativamente pequeños y están relacionados con variaciones en la dirección, es decir, son aquellos en los que la onda del electrón se excita desde un estado de momento situado ligeramente por debajo del momento de Fermi hasta un estado situado un poco por encima de dicho momento. De hecho, la intensidad de difusión para un pseudoátomo sencillo es totalmente independiente de las direcciones inicial y final de la onda. Por el contrario, la intensidad de difusión depende fundamentalmente de la diferencia angular entre ambas direcciones. La dependencia con una magnitud y no con dos simplifica notablemente los oportunos cálculos.

Los momentos inicial y final de la onda electrónica se pueden representar en forma de vectores, es decir, se trata de magnitudes caracterizadas por un módulo y una dirección. El módulo de cada uno de estos vectores es aproximadamente igual al momento de Fermi y la diferencia entre sus direcciones puede variar entre cero y 180 grados. El cambio que experimenta el momento de la onda de un electrón al ser difundido se puede representar también mediante un vector. Su módulo varía entre cero y el doble del módulo del vector momento de Fermi [*véase la ilustración de la página 49*]. En consecuencia, la intensidad de difusión fuera del pseudoátomo se debe determinar sólo para aquellos cambios de momento comprendidos entre cero y el doble del momento de Fermi. Este hecho se traduce una vez más en una ganancia importante en la simplicidad de los cálculos. La variación de la intensidad de difusión con el cambio de momento es un método matemático adecuado para representar la forma del pseudoátomo en el espacio.

¿Cuál es la relación entre el cambio de momento de la onda del electrón y la intensidad de difusión del pseudoátomo? De acuerdo con el principio de Pauli, los electrones de valencia no pueden ocupar ninguno de los niveles energéticos que ocupan los electrones de las capas más internas. Por consiguiente, la función de onda de un electrón de valencia presentará nodos en aquellas regiones donde la densidad de carga de los electrones de las capas más internas sea máxima. Así, la función de onda del electrón de valencia oscila más rápidamente en la región más interna del átomo, lo cual significa que su momento aumenta. En dicha región se producen grandes cambios en el momento de la onda del electrón.

Por otra parte, la energía del electrón de valencia en la región más interna del átomo es aproximadamente igual a cero. Este hecho se puede reflejar en el pseudopotencial extrapolando la energía hasta un valor cero en dicha región. Físicamente, este procedimiento equivale a suponer que, a pesar de que la onda del electrón incidente se altera en la región más interna del átomo, la amplitud de la onda fuera de dicha región es igual a cero: la onda del electrón de valencia resulta poco difundida al interaccionar con las capas más internas del átomo.



LA REFLECTIVIDAD OPTICA mide la respuesta de un material respecto a una radiación incidente. Esta magnitud expresa la proporción de la energía que transporta la radiación de una determinada longitud de onda cuando dicha radiación se refleja en el material en cuestión. En esta figura se representan los valores experimentales de la reflectividad del silicio cristalino (*curva negra*) para un amplio intervalo de longitudes de onda o energías incidentes. Utilizando estos mismos ejes se ha representado también la reflectividad teórica del silicio, tal como la predice la teoría del pseudopotencial (*curva de color*). Aunque el acuerdo entre las dos curvas es extraordinariamente bueno, la resolución no es lo suficientemente alta como para poner de manifiesto los detalles finos de la reflectividad y otras propiedades ópticas que fueron predichas primeramente por la teoría y descubiertas experimentalmente con posterioridad.

Difusión en los cristales

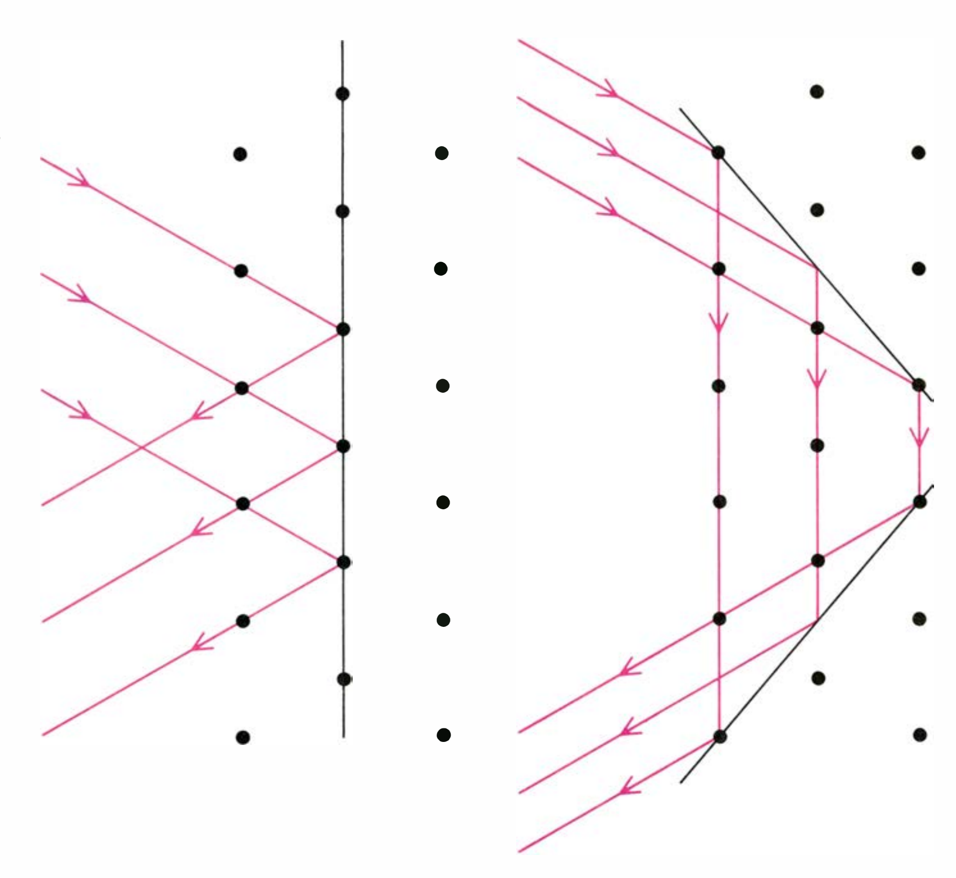
El pseudopotencial resulta particularmente adecuado para expresar la estructura de sólidos cristalinos sencillos, tales como los metales y semiconductores. En realidad, en algunas ocasiones es mucho más fácil calcular el pseudopotencial de un cristal que el de un átomo aislado. La difusión de ondas electrónicas en un cristal es extremadamente sensible al ángulo que forman las ondas incidentes y difundida. Como señalábamos antes, la onda incidente se difunde en un plano de átomos, como si se tratara de un espejo semiplateado. La disposición ordenada de los átomos de un cristal da lugar a la existencia de una serie de planos paralelos en ciertas orientaciones del espacio.

Cuando un frente de ondas incide sobre un plano de átomos, una parte de la onda se refleja y otra parte se transmite hasta el siguiente plano paralelo. Una parte de la onda transmitida se refleja entonces en ese segundo plano y es de-

vuelta hacia el primero, interfiriendo allí con la primera onda reflejada [*véase la ilustración de la página 51*]. Si la longitud de onda, el espaciado entre dos planos consecutivos y la onda incidente son tales que la diferencia de caminos entre las dos ondas es un múltiplo entero de la longitud de onda, la interferencia es constructiva. Si existen muchos planos paralelos, los ángulos de incidencia que corresponden a una interferencia constructiva resultan definidos con gran precisión: para todos los restantes ángulos la interferencia es destructiva.

El fenómeno que acabamos de describir se conoce con el nombre de difracción de Bragg, en honor de los físicos ingleses Sir William Bragg y de su hijo Sir William Lawrence Bragg, que investigaron la difusión de rayos X por sólidos cristalinos. Los ángulos críticos de la difracción de Bragg corresponden a los valores críticos del cambio de momento que se produce cuando se difunde la onda de un electrón. Las difusiones críticas dependen solamente de la orientación relativa de los diferentes conjuntos de planos atómicos paralelos entre sí y son las únicas difusiones de importancia en la determinación de las funciones de onda de un cristal. Desde el punto de vista histórico, esta simplificación es muy importante; por ejemplo, en el aluminio sólo se necesitan dos valores de la difusión crítica para describir las funciones de onda de unos 10^{23} electrones de valencia. Este hecho constituye un gran avance en relación con las muchas páginas de números que Hartree necesitó para publicar sus resultados sobre los electrones de un solo átomo de aluminio.

Los pseudopotenciales o intensidades de difusión correspondientes a las difusiones críticas se pueden expresar en forma de diferencias entre energías de los electrones. Estas energías se pueden determinar experimentalmente, como si se tratara de gases, haciendo pasar un rayo de luz a través de una lámina delgada de un cristal y observando las bandas espectrales o colores de la luz transmitida a través de dicha lámina. Una información análoga a ésta se puede obtener también estudiando la reflexión de la luz sobre cristales gruesos. De esta forma los valores del pseudopotencial se pueden calibrar experimentalmente para todas aquellas difusiones críticas para las que el cambio de momento es menor o igual al doble del momento de Fermi. Las funciones de onda del electrón de valencia para el cristal en cuestión se pueden calcular a continuación a partir de estos datos. Las funciones de onda resultantes son lo suficientemente precisas como para servir de base para realizar los cálculos de perturbaciones; estos cálculos convergen rápidamente hacia soluciones de la ecuación de ondas para muchas de las fases estructurales que puede presentar el sólido considerado.

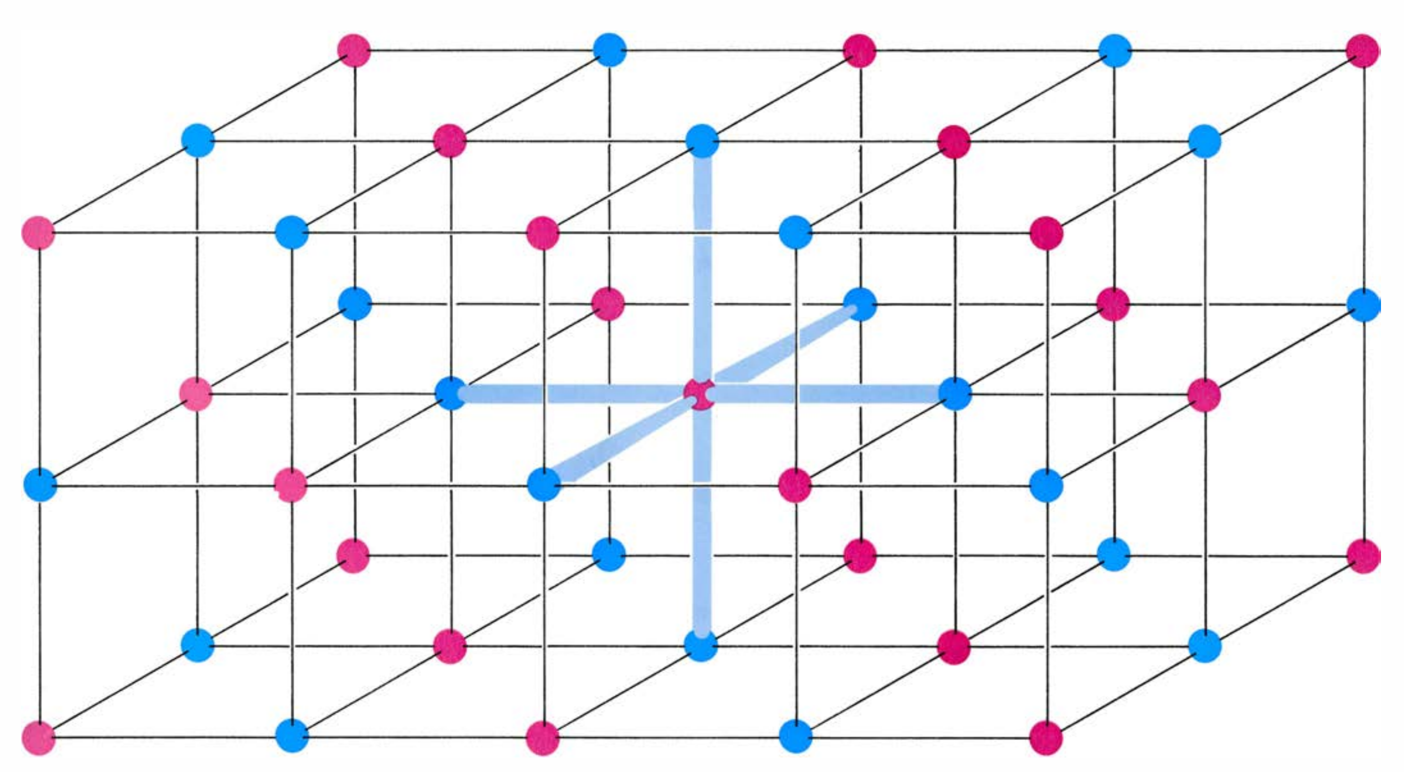


ORDENACION REGULAR de los átomos de un cristal, responsable de la difusión de las ondas electrónicas de forma análoga a como sucedería si tales ondas se reflejaran en planos cuando atravesaran dicho cristal. En ciertas configuraciones atómicas la difusión combinada por parte de dos o más de estos planos refuerza la difusión debida a un solo plano. Entre los elementos cuyos átomos se disponen en tetraedros, como sucede en el caso del silicio, el refuerzo que se produce en una difusión del tipo representado en la figura de la izquierda (difusión q_1) por parte de una difusión del tipo representado en la figura de la derecha (difusión q_3) puede conducir a la formación de un enlace covalente entre los átomos considerados. Tales enlaces impiden que los electrones del silicio se difundan a través de dicho material, al contrario de lo que sucede en un conductor eléctrico. En consecuencia, el silicio es un semiconductor y no un metal.

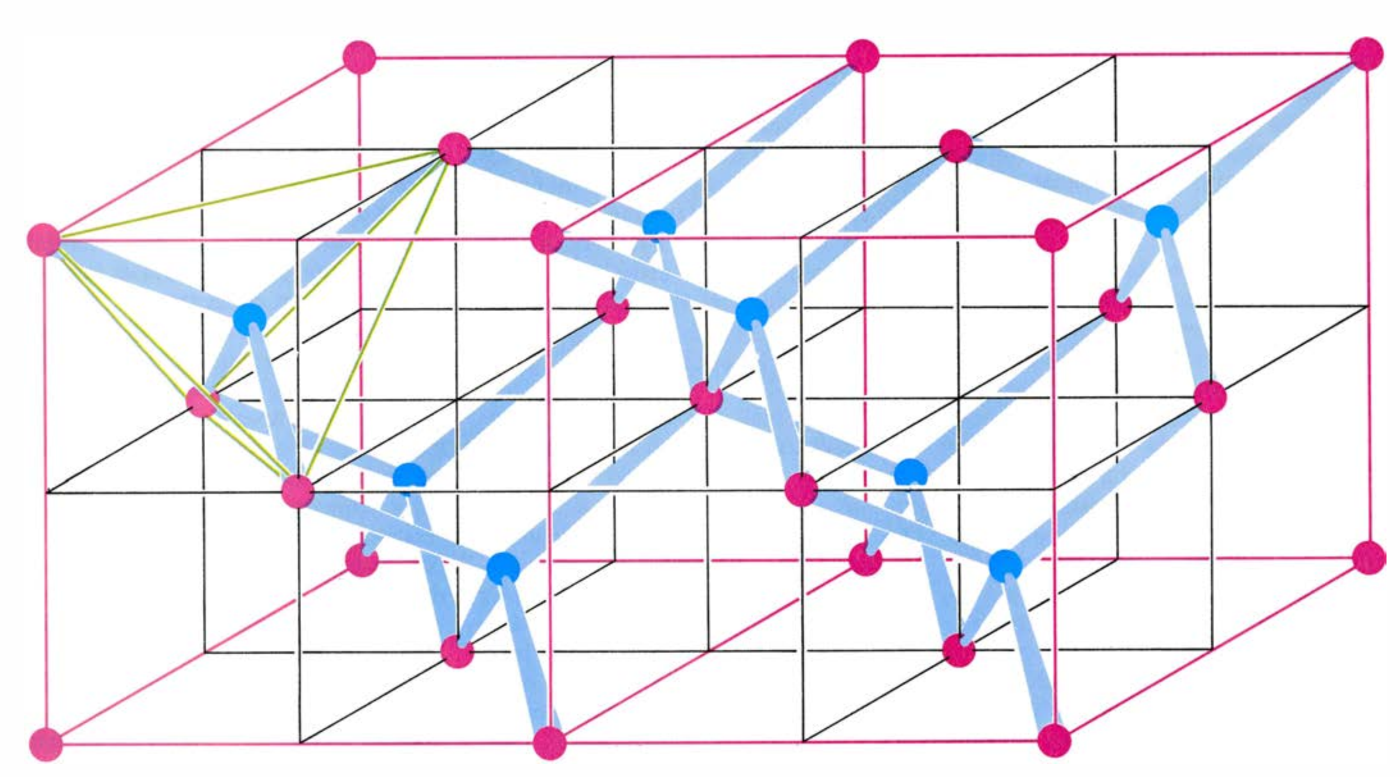
Sólidos elementales

En un metal, el aluminio por ejemplo, la difusión da lugar a dos cambios críticos del momento; vamos a designar q_1 y q_2 a los valores de dichos momentos. Las funciones de onda calculadas a partir de estas difusiones ponen de manifiesto que la energía de los átomos de aluminio es mínima cuando estos átomos se disponen de forma tal que cada uno de ellos está rodeado por otros 12 átomos vecinos. En cambio, en un semiconductor tal como el silicio, cada átomo se sitúa en el centro de un tetraedro y sólo está rodeado por otros cuatro átomos vecinos. La inferior densidad de la estructura tetraédrica respecto a la anterior origina un tercer conjunto principal de planos atómicos paralelos y, por consiguiente, una tercera difusión crítica q_3. En el caso del silicio, el pseudopotencial correspondiente a q_3 es relativamente alto y refuerza de forma significativa la difusión total de electrones. El cambio resultante en las funciones de onda de los electrones tiende a concentrar la carga de los electrones a lo largo de los enlaces tetraédricos. Se suele considerar que cada uno de los átomos que forman estos enlaces comparte dos electrones de valencia y, en consecuencia, estos enlaces se denominan covalentes.

La comparación de las magnitudes relativas del pseudopotencial correspondiente a q_1 y q_3 para un material dado permite predecir la configuración del enlace que poseerá dicho material. Esta comparación puede ser más simple que los métodos basados en las diferencias de enlaces que proporciona la química estructural. Todos los elementos con cuatro electrones de valencia situados en una misma columna del sistema periódico forman estructuras que pueden ser tetraédricas (sólidos semiconductores) o compactas (sólidos metálicos). El carbono, el silicio y el germanio son todos tetraédricos y semi-



LA RED CRISTALINA que poseen ciertos materiales ligeros tales como el cloruro sódico (sal común) presenta una configuración de sexto orden. Los enlaces atómicos en estos sólidos están originados por una transferencia de carga electrónica de un átomo a otro. Dicha transferencia de carga da lugar a una atracción entre dos átomos de cargas opuestas. Cada uno de los átomos del cristal está ligado a otros seis vecinos. Estos enlaces se llaman iónicos.



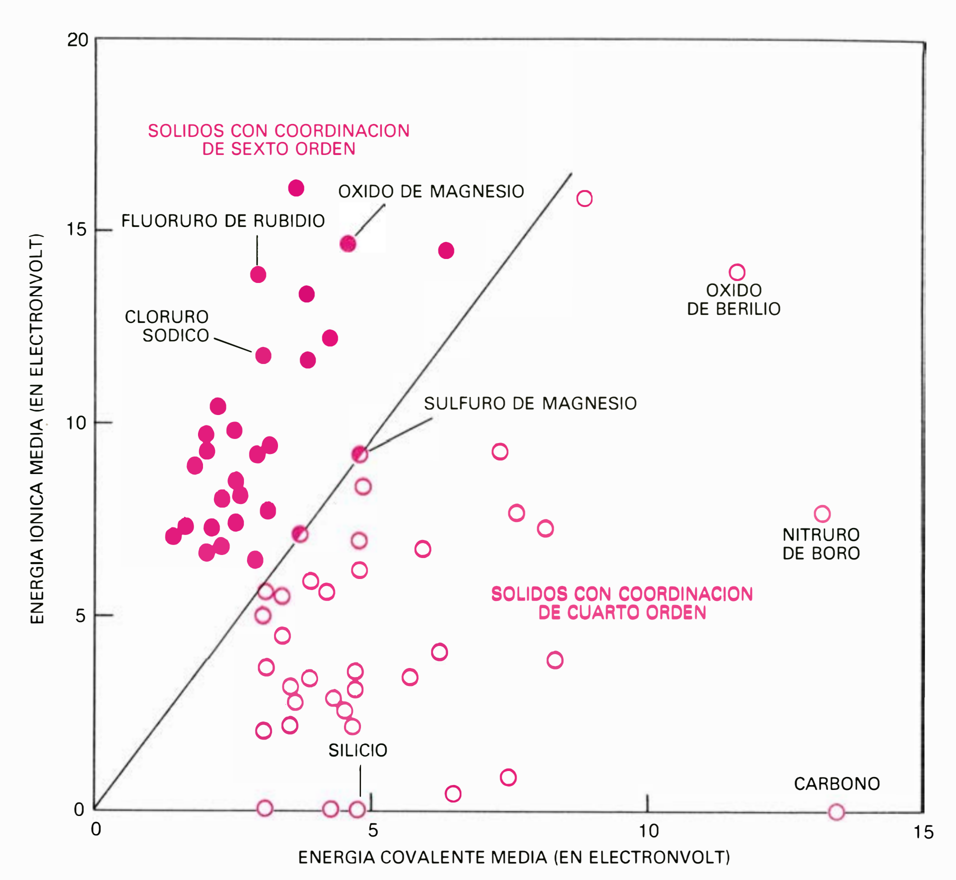
COORDINACION DE CUARTO ORDEN, o coordinación tetraédrica, que presenta la configuración de la red cristalina de ciertos compuestos binarios tales como el arseniuro de galio. Los correspondientes átomos están unidos entre sí por enlaces covalentes. En este tipo de enlaces la transferencia de carga electrónica entre dos átomos no es suficiente para dar lugar a enlaces iónicos; la carga se acumula en el espacio comprendido entre los dos átomos. Cada uno de los átomos azules del cristal (representando a uno de los dos elementos del compuesto) se sitúa en el centro de un tetraedro y está enlazado a los cuatro átomos rojos (representando al otro elemento del compuesto) que se disponen en los vértices de dicho tetraedro. En esta figura se indica uno de tales tetraedros mediante líneas de color verde (*izquierda*). De forma análoga, cada átomo rojo se sitúa en el centro de un tetraedro cuyos vértices están ocupados por cuatro átomos azules. La estructura resultante es una red cúbica; los átomos rojos se sitúan en el centro de las caras y en los vértices de los cubos rojos, en tanto que los átomos azules se sitúan en los centros de la mitad de los cubos negros que resultan de la división de los cubos rojos anteriores.

conductores; el plomo es un metal compacto. El estaño presenta dos formas estables: es un metal blanco para altas temperaturas y un semiconductor gris tetraédrico para bajas temperaturas. La existencia de dos fases cristalinas de estaño ha sido un hecho particularmente difícil de explicar en términos de química estructural. En cambio, el problema se puede resolver muy fácilmente en el marco de la teoría del pseudopotencial.

La cohesión de los enlaces covalentes en aquellos cristales que poseen una estructura tetraédrica se puede relacionar con la intensidad de difusión crítica q_1. Sin embargo, debido a la relación geométrica existente entre los planos que originan una difusión q_1 y los que originan una difusión q_3, dos difusiones q_3 sucesivas tienen el mismo efecto que una q_1. En consecuencia, la intensidad del enlace depende de la intensidad de la difusión q_1 más el cuadrado de la intensidad de la difusión q_3. Si la intensidad de la difusión total es suficientemente grande, los átomos del material considerado estarán unidos por enlaces covalentes.

En el caso del carbono, silicio y germanio, los pseudopotenciales que corresponden a la difusión q_1 y al cuadrado de la difusión q_3 son ambos positivos y, por ende, la intensidad de difusión total deviene lo suficientemente elevada como para que el enlace resultante sea covalente. En cambio, para el plomo, los dos componentes del pseudopotencial tienen signos opuestos y tienden a anularse. La difusión no es lo suficientemente grande como para formar un enlace covalente y, por tanto, el plomo es metálico. En el caso del estaño, el pseudopotencial correspondiente a q_1 es aproximadamente igual a cero. En consecuencia, la difusión tiene un valor muy próximo al valor crítico que se necesita para formar enlaces covalentes y es la temperatura la que determina la estructura interatómica del material.

La interpretación que proporciona la teoría del pseudopotencial para las estructuras del estaño gris y estaño blanco es típica de la simplicidad que caracteriza a las conclusiones de esta teoría. El concepto del pseudopotencial y las expresiones matemáticas que lo utilizan son tan fácilmente comprensibles y proporcionan tantos éxitos que esta teoría se ha convertido rápidamente en un nuevo lenguaje para los teóricos del estado sólido. El conjunto de propiedades susceptibles de discusión con este nuevo lenguaje es tan amplio que se ha erigido probablemente en el único método adecuado para plantear una descripción mecánico-cuántica de los electrones en dichos materiales.



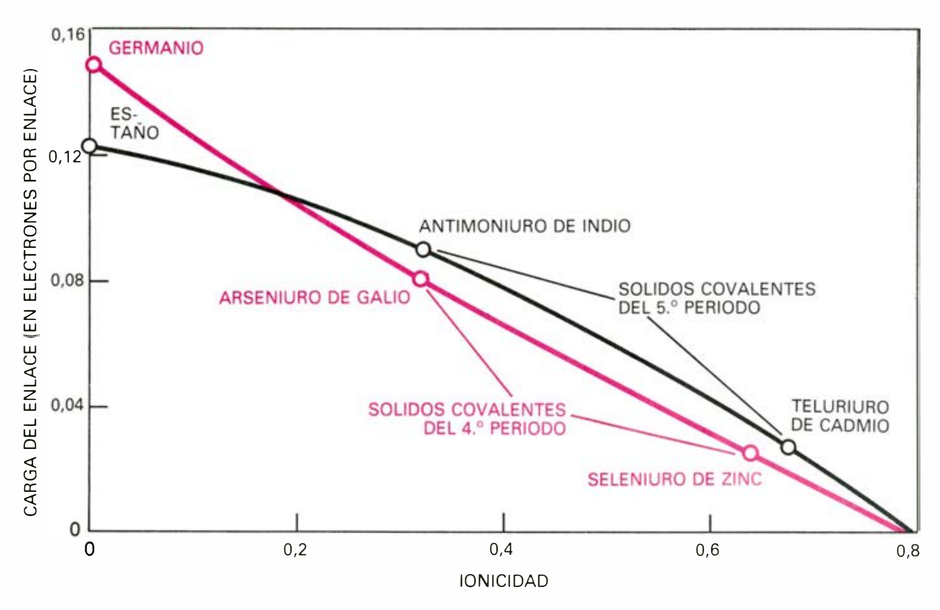
ESTOS SOLIDOS incluidos en el gráfico poseen ocho electrones de valencia en el enlace de cada par de átomos. Se exponen los valores de la energía covalente y de la energía iónica que se pueden deducir a partir de los correspondientes pseudopotenciales atómicos para cada enlace. Los sólidos iónicos con una coordinación de sexto orden se representan mediante puntos coloreados; los sólidos covalentes con una coordinación de cuarto orden, círculos coloreados. El caso de dos sólidos que pueden asumir indistintamente una u otra de dichas configuraciones se indica mediante círculos huecos. De acuerdo con la teoría del pseudopotencial, cuando la relación entre la energía iónica y la energía covalente de un átomo es mayor que la relación definida por la línea negra de la figura, la configuración de los átomos del sólido cambia de una coordinación de cuarto orden a una de sexto orden. El gráfico demuestra que la teoría del pseudopotencial es capaz de predecir las configuraciones atómicas de más de 60 de estos sólidos.

Compuestos binarios

La teoría del pseudopotencial se ha aplicado ya a la mayoría de los elementos del sistema periódico. Los pseudopotenciales también dan cuenta adecuada de los enlaces existentes en las aleaciones y en los compuestos sólidos binarios. En estos últimos compuestos, los átomos de los diferentes elementos atraen a los electrones de valencia con diferentes intensidades y, por tanto, la carga de dichos electrones se desplaza hacia uno de los átomos. Se forma entonces un enlace especial debido a la atracción electrostática entre los dos átomos de cargas opuestas. El resto de la energía almacenada en el enlace es covalente o de carácter metálico. Al igual como sucede en los enlaces que unen a dos átomos de un mismo elemento, esta energía se debe a la tendencia de la densidad de carga a distribuirse de una forma tal que la energía total del sólido sea mínima.

La ionicidad de un enlace cristalino se puede describir en función de las diferencias entre los pseudopotenciales de los dos átomos que constituyen el enlace, evaluadas para ciertos cambios críticos del momento producidos por la difusión en los planos de la red cristalina. (Como comprobación de la consistencia de este argumento, consideremos las circunstancias bajo las que se origina un enlace entre dos átomos de un mismo elemento. En este caso se puede ver fácilmente que cuando la diferencia entre los pseudopotenciales de los dos átomos es igual a cero, la ionicidad del enlace es también igual a cero: no se produce ningún desplazamiento neto de los electrones de valencia en ningún sentido.) La intensidad de la parte covalente o metálica del enlace se puede describir mediante la suma de los pseudopotenciales de los dos átomos.

Los cálculos del pseudopotencial de las funciones de onda de los electrones en sólidos parcialmente iónicos y parcialmente covalentes ponen de manifiesto que la densidad de carga de los



IONICIDAD DE UN ENLACE. Constituye una medida de la energía total del enlace que se puede atribuir a un enlace de tipo iónico. La teoría del pseudopotencial permite calcular la carga que existe entre dos átomos unidos por un cierto enlace (es decir, la carga electrónica que excede a la carga atómica de fondo). En esta figura se representa dicha carga en función de la ionicidad del enlace para seis sólidos enlazados covalentemente. Para los sólidos elementales germanio y estaño no hay transferencia de carga, debido a que no existe diferencia en la afinidad de dos átomos idénticos para los electrones de valencia. En consecuencia, la ionicidad vale cero y la carga del enlace es máxima. Cuando se forman compuestos binarios a partir de elementos a la izquierda y derecha del germanio y del estaño en el sistema periódico, aumenta la ionicidad del enlace y disminuye la energía de enlace total. Si la energía del enlace se extrapola hasta cero para los sólidos covalentes constituidos por elementos de un mismo período del sistema periódico, la ionicidad vale 0,79. Este valor concuerda con el valor crítico que corresponde a la ionicidad para la línea negra de la figura que se reproduce en la página anterior. La teoría del pseudopotencial predice que la transición entre los enlaces iónico y covalente tiene lugar cuando la carga del enlace se anula.

electrones de valencia es máxima a lo largo del enlace entre los dos átomos y no en las proximidades de cualquiera de ellos. En consecuencia, se puede definir una magnitud denominada carga del enlace de forma tal que represente la cantidad de carga existente en la región del enlace en exceso o las cargas resultantes de la superposición de las densidades de carga de los átomos aislados que constituyen el enlace considerado.

De aquí se desprende que si la carga del enlace que predice la teoría del pseudopotencial es mayor que cero, un compuesto binario con un promedio de cuatro electrones de valencia formará enlaces covalentes con la estructura tetraédrica del diamante o del silicio. Sin embargo, si la carga del enlace predicha es igual a cero, no se forman enlaces tetraédricos. En su lugar, se forma una estructura iónica en la cual cada átomo aparece rodeado por seis átomos en lugar de cuatro [*véanse las ilustraciones de la página 56*]. Las estructuras de más de 60 compuestos binarios de la forma $A^N B^{8-N}$ (los superíndices indican el número de electrones de valencia de cada uno de los átomos) se han predicho correctamente mediante la teoría del pseudopotencial en términos de la contribución iónica y covalente a la correspondiente energía de enlace.

Quizás el aspecto más importante de la teoría del pseudopotencial sea su posibilidad de crecimiento al aumentar su sofisticación física y matemática. El desarrollo acumulativo ha permitido a la teoría del pseudopotencial tener presente tanto los hechos físicos fundamentales como las cuestiones de detalle cuando procede a describir la estructura cuántica de los diferentes materiales. La enorme simplicidad conceptual de esta teoría ha hecho posible la incorporación inmediata de los continuos avances experimentados por el cálculo numérico relacionados con el desarrollo de los ordenadores electrónicos. A continuación nos limitaremos a mencionar brevemente algunos de los progresos más recientes de esta teoría.

Avances teóricos recientes

La teoría del pseudopotencial ha sido una de las herramientas teóricas más importantes en la investigación de las propiedades de las superficies de los sólidos. Las características de los enlaces resultan profundamente perturbadas en las superficies y en las interfases; la redistribución de la densidad de la carga electrónica que se produce en esas regiones puede afectar a los enlaces entre átomos situados varias capas más adentro del material considerado. Joel A. Appelbaum y Donald R. Hamann, de los Laboratorios Bell, James R. Chelikowsky, Steven G. Louie y Michael Schlüter, de la Universidad de California en Berkeley, y Kosal Pandey, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la International Business Machines Corporation, han descrito la estructura de los estados de enlace roto y otros estados electrónicos en las superficies de los sólidos. Las propiedades de las superficies de separación (interfases) entre metales y semiconductores y entre dos semiconductores se han interpretado también con la ayuda de esta teoría. El estudio de estas interfases es muy importante en relación con el diseño de muchos dispositivos electrónicos.

A lo largo de los dos últimos años Ming Tang Yin y uno de los autores de este artículo (Cohen) han calculado la energía total de los materiales semiconductores con una precisión de alrededor de 0,02 electronvolt por átomo para una amplia variedad de densidades y volúmenes. Estos cálculos han proporcionado una comprensión cuantitativa de fenómenos tales como la inestabilidad estructural del estaño gris y blanco. Cuando tales cálculos se llevan a cabo para otros materiales, el investigador puede explorar los cambios de fase bajo condiciones muy diversas de presión y temperatura. Por ejemplo, la estructura interatómica del silicio es tetraédrica a presión y temperatura ambiente, pero este material adopta una forma metálica más densa para presiones más elevadas. El valor calculado de la presión para la que se produce dicho cambio de fase concuerda con el valor determinado experimentalmente.

La utilización del concepto de pseudoátomo ha hecho posible que los teóricos puedan discutir las propiedades de los elementos ligeros y pesados y de los compuestos covalentes, iónicos y metálicos a lo largo de todo el sistema periódico con mayor facilidad y fiabilidad que las relativas a los elementos ligeros hace 25 años. Hace cincuenta años la física atómica era el único campo de la ciencia en que las interacciones cuánticas se podían interpretar correctamente. En la actualidad, tanto desde el punto de vista conceptual como desde el punto de vista práctico, el estudio mecánico-cuántico de los materiales es más simple que el estudio de la estructura electrónica de los átomos con más de un electrón de valencia. Como resultado de una amplia colaboración sobre los pseudoátomos que integra a científicos de todo el mundo, podemos afirmar que la alquimia, la antigua ciencia mágica de los materiales, lleva camino de convertirse en uno de los campos más desarrollados del conocimiento.

Arqueología de la Cueva de Lascaux

Cuarenta años de trabajo han revelado muchas cosas acerca de cómo se crearon las pinturas paleolíticas de Lascaux. También han llamado la atención sobre los centenares de grabados que compiten en importancia con las pinturas

Arlette Leroi-Gourhan

El yacimiento rupestre de Lascaux, con su magnífico despliegue de unas 600 pinturas de la Edad de Piedra Antigua, fue descubierto hace más de 40 años. Situada en la región de la Dordoña, en el suroeste de Francia, la cueva ha permanecido cerrada a todas las visitas, excepto las autorizadas oficialmente, durante los últimos 20 años. El cierre formaba parte de un esfuerzo de conservación, afortunadamente coronado con el éxito, destinado a detener el proceso de deterioro de esos tesoros del arte paleolítico. Hasta hace poco, sin embargo, pocos profanos sabían que las grandiosas pinturas de Lascaux constituían sólo una fracción de la riqueza en material arqueológico descubierto en la cueva durante los cuatro últimos decenios.

Entre los descubrimientos figuran cerca de 1500 grabados en las paredes y en los techos de la cueva. Todos ellos fueron pacientemente copiados por el abate André Glory, quien, hasta su prematura muerte, en 1966, fue, con mucha diferencia, el más infatigable de los investigadores científicos de Lascaux. Glory y otros han exhumado también los útiles de sílex empleados en la realización de los grabados; han encontrado las lámparas de piedra que proporcionaban luz a los artistas; han recuperado las paletas que soportaban los pigmentos de los pintores y, en fecha muy reciente, han estudiado los minerales que se molían para obtener los pigmentos. Incluso han podido reconstruir los a modo de andamios que permitían a pintores y grabadores trabajar en la superficie de rocas situadas muy fuera de su alcance normal. Estos y otros hallazgos revelan a los prehistoriadores algunas de las actividades del hombre de Lascaux, cuando la Edad de Piedra Antigua entraba en sus fases terminales, hace unos 17.000 años.

El descubrimiento de la cueva, en septiembre de 1940, a principios de la Segunda Guerra Mundial, se ha atribuido más de una vez a un grupo de niños de aldea, tras la caída de un perro en un profundo agujero. La verdad es algo distinta. Un muchacho de la aldea de Montignac, a un kilómetro de distancia, observó en el suelo un agujero. Hacía poco que éste se había abierto al arrancar un pino, pero ningún perro había caído a él. El joven y unos amigos empezaron a sondear la profundidad del hueco arrojando piedras.

Cada vez más picados por la curiosidad, los muchachos agrandaron la abertura y se deslizaron por un túnel en rampa, de arcilla húmeda; aterrizaron bastante más abajo de lo que esperaban. Lo que allí vieron, al resplandor de una débil linterna, les dejó estupefactos. Después de llevar al sitio al maestro de escuela de la localidad, dieron cuenta de su descubrimiento en el periódico de la misma escuela. Algunos especialistas en estudios prehistóricos fueron informados del hallazgo y se excavó una rampa que diera acceso algo más cómodo al interior de la cueva. El primer arqueólogo profesional que inspeccionó el yacimiento fue el abate Henri Breuil.

El extremo inferior de la rampa da a una gran cámara de unos 20 metros de largo. Su techo está cubierto de inmensas pinturas de toros; algunas de las figuras de estos animales miden más de cinco metros de longitud. Al otro extremo de este "Salón de los Toros" se abren dos pasadizos. Uno de ellos se encuentra de frente; el otro arranca a mano derecha. El techo de la galería situada enfrente (conocida como "Callejón Axial") está cubierto también de pinturas; éstas representan ciervos, caballos, toros bravos, íbices y un bisonte. El acceso al ramal de la derecha (conocido sencillamente como "el Pasadizo") era difícil en los primeros años. Los visitantes tenían que andar a gatas al principio, aunque pronto se veían recompensados por otra serie de pinturas de animales. Un segundo ramal, a mano derecha, conduce al "Abside", detrás del cual se halla "el Pozo", una cavidad de cinco metros con un curioso grupo de pinturas en el que se ve a un hombre, a un pájaro posado en una pértiga, a un rinoceronte y a un bisonte embistiendo, con una cabeza de caballo encima de él. A la izquierda del "Abside" se abre "la Nave". Aquí, y en el largo y estrecho corredor que la sigue, hay otras varias pinturas de animales. El corredor atraviesa el "Agujero del Gato" para terminar en el "Callejón de los Felinos", donde no sólo se encuentran grabados de felinos, sino también de animales de otras familias. Esta última excursión pone fin al recorrido del visitante por Lascaux.

Poco después de la terminación de la guerra, la cueva fue acondicionada para recibir visitas y Lascaux quedó convertido en un museo subterráneo. Después de dos decenios de turismo, se puso de manifiesto que el polvo, la hu-

DOCE PIGMENTOS utilizados por los pintores de Lascaux y que van desde el amarillo pálido (*A*) al negro (*70A*). Todos los pigmentos empleados en Lascaux, excepción hecha de aquellos que llevaban carbón, se preparaban de minerales en polvo. Aun así, el uso de un solo mineral era raro; la mayoría de las veces los minerales estaban mezclados. El polvo que lleva la etiqueta *66A* es de una pureza desusada; se trata de una mezcla de hematites (70 por ciento), arcilla (20 por ciento), cuarzo (5 por ciento) y otras sustancias. Por otra parte, el polvo *70B* es un negro que contiene un 40 por ciento de fosfato de calcio, un 25 de cuarzo y un 15 de dióxido de manganeso, el principal mineral en la composición de los negros.


A
73
68
74
B
66B
66A
71
70B
70A

medad y los hongos que penetraban en la cueva en compañía de los visitantes amenazaban con destruir esta singular galería paleolítica. El cierre de Lascaux al turismo, en 1963, ha salvado las pinturas. En lo que sigue voy a relatar brevemente cuál ha sido la labor del abate Glory y de otros en los cuatro últimos decenios y lo que éstos han revelado acerca del contenido a la cueva.

¿Cómo averiguar la fecha de una pintura prehistórica? Quizá fuera este el mayor de los problemas que se plantearon desde un principio los estudiosos de Lascaux. No se conoce ningún modo de datar tal pintura por sí misma; hay que empezar por determinar el contexto de la obra de los artistas. Lo que significa rastrear los vestigios que los artistas hayan dejado en pos de sí. Para encontrar tales vestigios es preciso excavar, primero, para poner al descubierto los niveles del terreno que encierran artefactos contemporáneos de la obra de los artistas. Seguidamente, hay que establecer la secuencia de los niveles, dado que no todos estos niveles, de arriba abajo, van a estar presentes en todas las partes del yacimiento. Conocida la estratigrafía, hay que establecer la correspondencia de contemporaneidad entre niveles y pinturas.

Afortunadamente, en Lascaux no se planteó este último problema. Las primeras investigaciones estratigráficas fueron realizadas por el abate Glory, quien practicó 15 cortes en zanjas distribuidas por toda la cueva. Las huellas de actividad humana que encontró procedían en su totalidad de un mismo estrato. No hizo falta otra prueba de que se trataba de un estrato contemporáneo de las pinturas desde que, junto con otros objetos del estrato, se descubrieron las lámparas, las paletas de piedra y las pellas de la sustancia colorante mi-



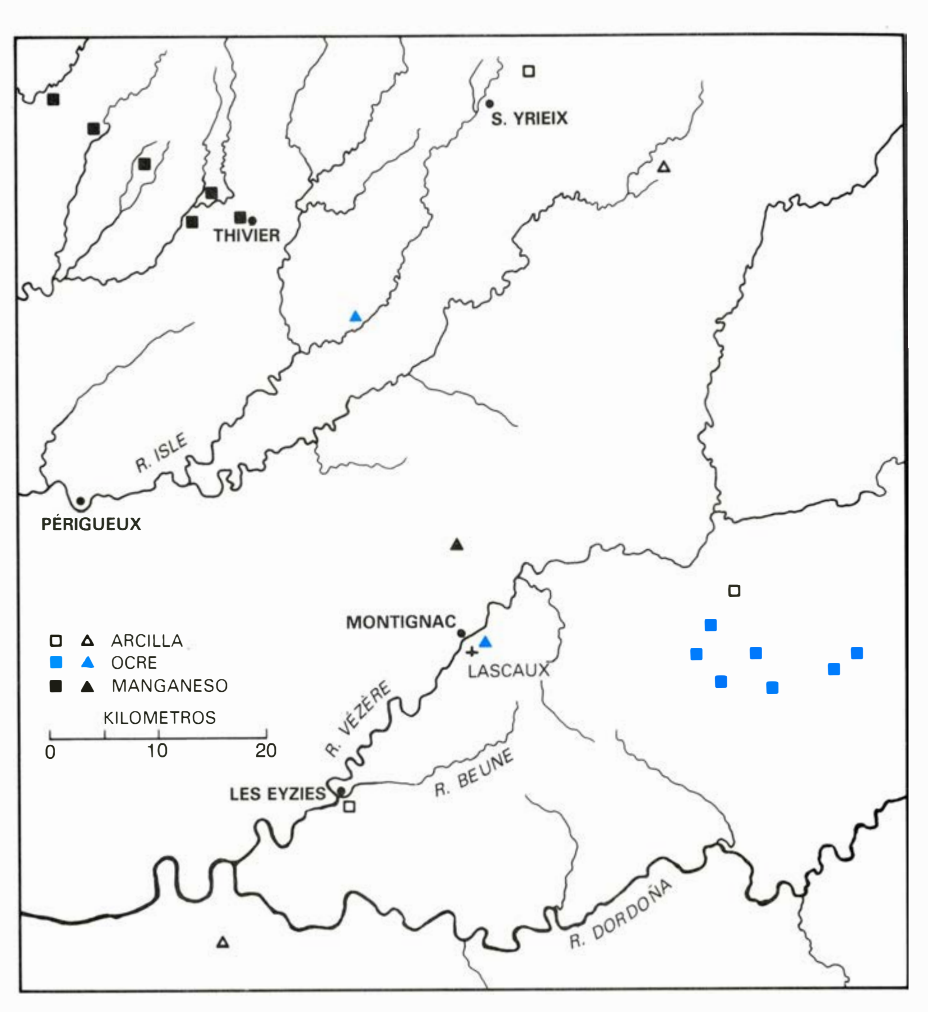
CABEZA DE VENADO, con el ojo y la oreja cuidadosamente delineados, grabada en la pared sur de la zona denominada "el Abside" en la Cueva de Lascaux. El cuerpo está también diseñado, pero no lo recoge esta figura. Las exageradas astas, delineadas en parte, fueron además pintadas de negro.

neral utilizada por los pintores de Lascaux.

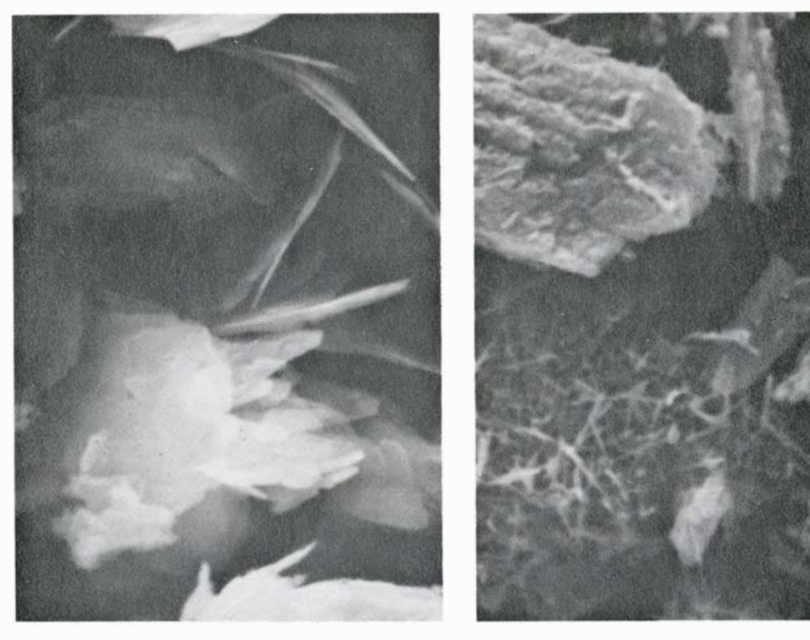
Los restos arqueológicos exhumados en las excavaciones indican que, aunque la cueva nunca sirvió a efectos de habitación, quienes hicieron las pinturas y los grabados trabajaron en ella muchas horas seguidas, haciendo frecuentes comidas en el tajo. Parece probable también que en la cueva se celebrasen ritos religiosos. En el Pozo, más allá del Abside, hay restos de comidas, el candil de piedra más hermoso de los encontrados en Lascaux, conchas marinas de adorno y puntas de lanza de hueso. Entre las conchas había una especialmente bella, perforada para ensartarla como adorno; muestra unas muescas producidas por el cordón de que colgaba y conserva manchas de ocre rojo. Dado que la costa más próxima se encuentra a 200 kilómetros de distancia, las conchas han tenido que venir, por lo menos, desde allí. El Pozo parece haber sido una especie de santuario.

Los estudios estratigráficos realizados en Lascaux, junto con los análisis de partículas de polen sacadas del estrato y pertenecientes a plantas de aquella época, indican que el hombre paleolítico utilizó la cueva durante un período relativamente breve, quizá de sólo unos cuantos siglos. Ello va de acuerdo con el hecho de que los útiles de piedra y de hueso exhumados en la cueva pertenecen todos a una sola cultura del Paleolítico Superior y tardío, muy conocida en la Dordoña y en otros lugares de Francia: la magdaleniense inferior. También concuerda con los estudios de las muchas pinturas de Lascaux y los aún más numerosos grabados acreditativos de que su estilo es homogéneo. Así pues, todo coincide en señalar la utilización de la cueva en una sola y corta etapa. Las fechas suministradas por el carbono-14, a partir del carbón asociado con los candiles de los pintores, sitúan esa época alrededor del 15.000 a. C.

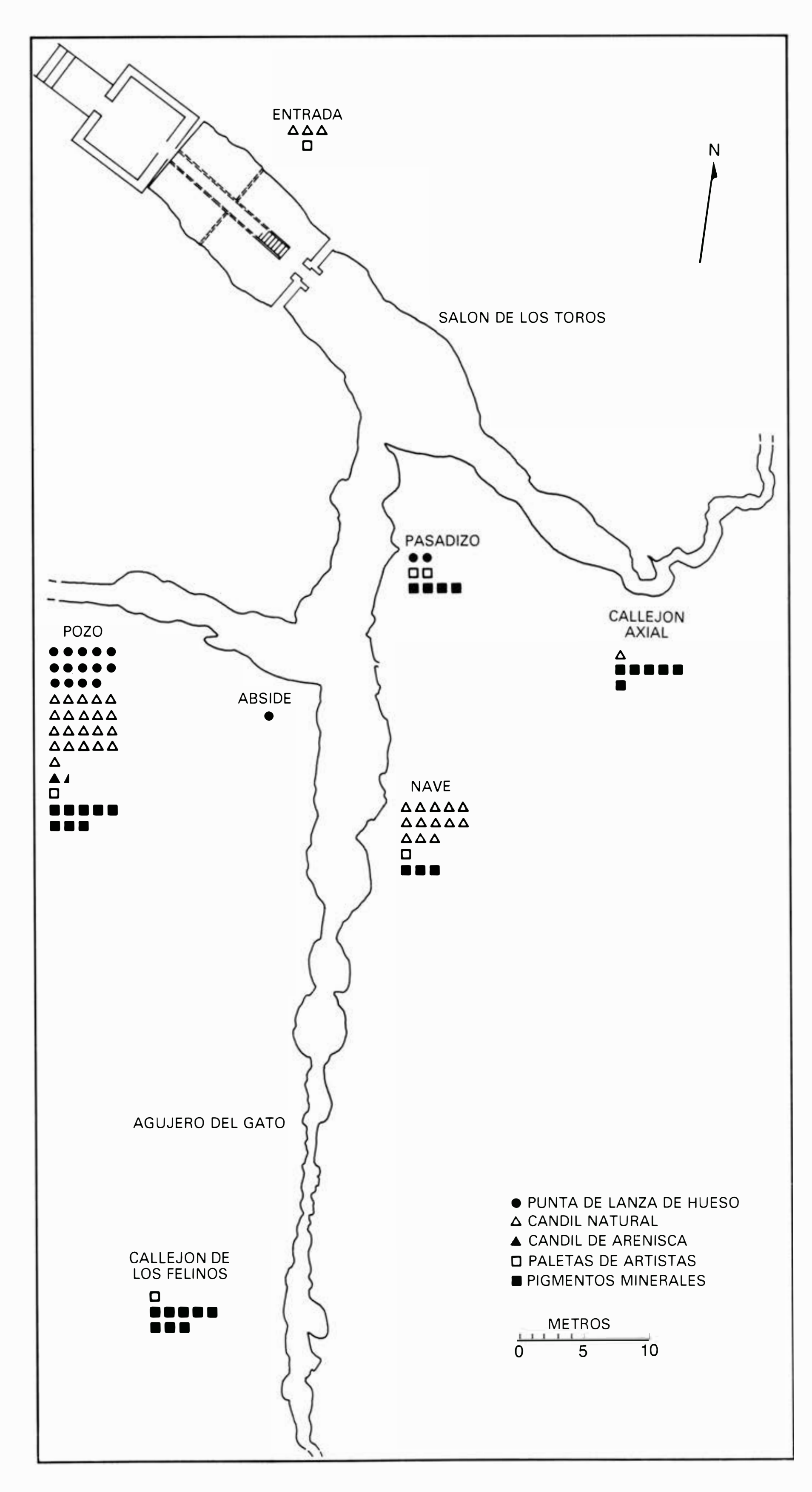
¿Cómo hacían los artistas su trabajo? Su primer problema debe de haber sido la necesidad de luz artificial. En tiempos del magdaleniense, la entrada de la cueva tenía un buen tamaño y el techo se hallaba a unos tres metros sobre el nivel del suelo. Esto significa que la parte delantera del Salón de los Toros recibía con seguridad alguna luz del día. En el fondo del salón, sin embargo, la luz natural no habría bastado para trabajar con ella, mientras que, en el Callejón Axial y en todas las demás galerías, la luz artificial constituía una necesidad imperiosa.



LA CUEVA DE LASCAUX, cerca de la aldea de Montignac, junto al río Vézère, a 40 kilómetros al este de Périgueux, se encuentra en una región donde son corrientes los depósitos de arcilla, óxido de manganeso y ocre rojo y amarillo (*cuadrados*). El yacimiento más próximo de manganeso registrado en los mapas de los servicios geológicos se encuentra en Thivier, a 40 kilómetros al noroeste de Lascaux, y las fuentes más próximas de arcilla, ocre rojo y ocre amarillo se hallan a 20 kilómetros al este. Los investigadores encontraron manganeso a seis kilómetros de la cueva y los dos ocres a menos de 500 metros (*triángulos*).



TROZOS DE PINTURA de Lascaux aparecen en estas fotografías de microscopio electrónico. A la izquierda hay un ocre rojo, aumentado 6000 diámetros; los cristales laminados son hematites (Fe_2O_3). A la derecha, un manganeso negro, aumentado 7000 diámetros; los cristales parecidos a agujas son pirolusita (MnO_2). El estudio lo realiza Pamela B. Vandiver, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



LOS OCHO HITOS PRINCIPALES de la cueva de Lascaux se recogen en este plano; también se indica dónde aparecieron algunos de los utensilios clave. El venero más rico en artefactos fue "el Pozo". Proporcionó 21 candiles de piedra sin labrar, uno, también de piedra, pero cuidadosamente trabajado (además de un fragmento de otro), 14 de las 17 puntas de lanza de hueso halladas en Lascaux, una de las seis paletas de artista y ocho de las 29 pellas de minerales que los artistas pulverizaron para obtener los colores. (Se hallaron otras 129 pellas, pero no se tomó nota de su emplazamiento.) Muchos candiles de piedra se encontraron también en "la Nave". En ésta, en "el Pasadizo", en el "Callejón Axial" y en la más remota galería, el "Callejón de los Felinos", a 100 metros de la entrada, se recuperaron más minerales.

No ha de sorprender, pues, que en Lascaux se hayan encontrado montones de candiles. Unos 130 de ellos se han estudiado meticulosamente. Los artistas magdalenienses no hubieron de realizar un gran esfuerzo para obtener el tipo de candil que usaban más a menudo: estos candiles eran, sencillamente, piedras seleccionadas en la ladera rocosa de los alrededores de la boca de la cueva y que tenían rebajes naturales en forma de cazoleta. A decir verdad, las depresiones de algunas de las piedras son tan someras, que ofrecen dudas de si han podido servir de lámparas. Los restos de tizne, carbón y ceniza, sin embargo, junto con los indicios de haberse calentado, disipan las dudas de cuál fue su función.

Para entender mejor cómo funcionaban estos sencillos candiles, Brigitte y Gilles Delluc, del Museo de Les Eyzies, recogieron piedras planas semejantes en las cercanías de la cueva y practicaron con ellas algunos experimentos. Descubrieron que se obtenían mechas apropiadas con liquen seco, musgo o ramas de enebro. (Los análisis del carbón de siete de las lámparas habían identificado la madera de enebro como uno de los materiales de las mechas.) El combustible que les resultó más apropiado fue el sebo; en cada candil pusieron un trozo de 50 gramos de esa grasa animal. Ardía sin humo, daba tanta luz como una vela ordinaria y los 50 gramos duraron casi una hora. Si se deseaba más iluminación no había más que disponer varias mechas en una lámpara.

El hermoso candil que apareció en el Pozo estaba delicadamente labrado en arenisca roja y decorado con líneas incisas. Apareció en el suelo del pozo, precisamente debajo del extremo de la cola del rinoceronte de la pintura que había encima. El refinamiento con que la lámpara estaba trabajada y su presencia en lo que se reputaba como santuario parecen indicar que su uso no debió limitarse a la mera iluminación.

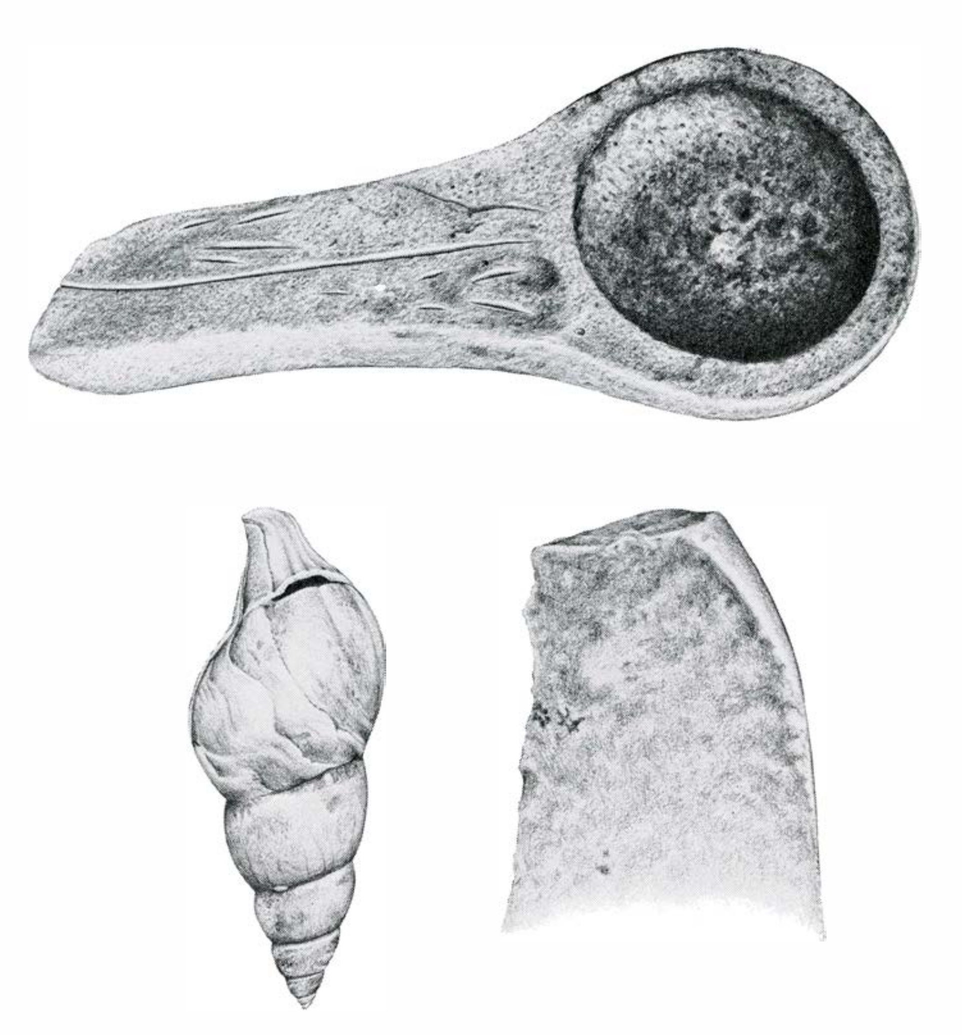
El segundo problema se les planteaba a los artistas tan pronto como éstos hubieran decidido qué partes de la cueva eran las adecuadas para pintar. La posibilidad de hacerlo dependía del estado de la superficie de la roca. Por ejemplo, en el Callejón Axial, la superficie que está lo bastante lisa para pintar se encuentra a tres o cuatro metros sobre el nivel del suelo y, por tanto, fuera de alcance. Lo mismo se puede decir de muchas de las superficies más aptas para pintar en los otros lugares de

la cueva. En el Salón de los Toros uno se imagina a los magdalenienses trayendo arbolillos y afianzándolos hasta formar un tosco andamio al que pudiese trepar el pintor. En el Callejón Axial, sin embargo, se han encontrado vestigios de un andamio de mayores pretensiones. A partir de esos indicios ha podido reconstruirse cómo el pintor dispuso de una plataforma horizontal cerca del techo de la galería.

Los investigadores encontraron una serie de rebajes labrados en la roca a ambos lados de la galería, todos a un mismo nivel, a unos dos metros por encima del suelo. Los huecos habían sido rellenados de arcilla; en este relleno blando de arcilla se aprecian orificios de unos 10 centímetros de profundidad. La superficie de la pared se había recubierto más tarde de una delgada capa de calcita, mineral soluble, de modo que 17 de las entalladuras quedaron perfectamente conservadas. Es evidente que, a los entrantes de cada lado, y asentadas en ellos con arcilla, se ajustaron robustas ramas de árboles, lo bastante largas para abarcar la galería. Esta serie de traviesas podía después soportar un piso de otras ramas, lo bastante alto para poner todo el techo al alcance de los pintores.

Una vez acomodados en su plataforma, los pintores se encontrarían muy cómodos, pues, a juzgar por los huesos de animales depositados en el suelo de abajo, ni siquiera se molestaban en bajar para comer. Otros huesos animales señalan también el uso frecuente de un segundo lugar de la cueva como comedor: una ancha visera de piedra de la Nave, cerca de la pintura de una vaca negra.

Los estudios de los huesos de ambos depósitos indican que los artistas de Lascaux eran muy dados a comer carne de renos jóvenes, aunque eso quizá dependiera más de la caza disponible que de sus preferencias gastronómicas. En relación con ello es interesante observar que sólo una de las pinturas de animales de Lascaux representa a un reno. Hechos como éste contribuyen a subrayar los riesgos que corren quienes tratan de especular sobre el "porqué" de la pintura paleolítica.



TRES PRODUCTOS DE ARTESANIA de entre los muchos descubiertos en Lascaux: el candil de piedra cuidadosamente labrado aparecido en el Pozo (*arriba*), una concha marina manchada de ocre y perforada para llevarla como adorno personal (*abajo, a la izquierda*) y la punta, desgastada y pulimentada por el trabajo, de uno de los 27 útiles para grabar, de sílex, aparecidos en la cueva (*abajo, a la derecha*).

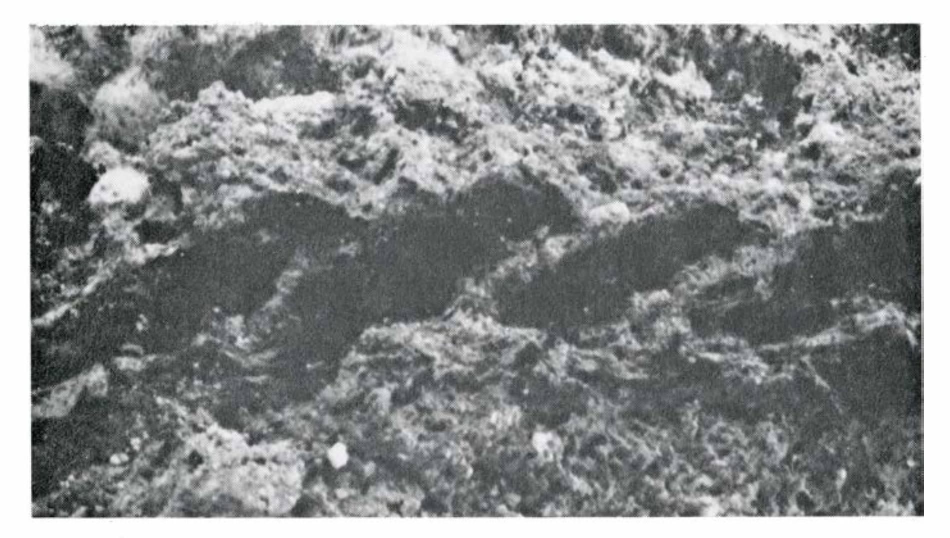
Los pigmentos minerales empleados por los pintores magdalenienses en Lascaux han sido objeto de tres estudios relacionados entre sí. En primer lugar, la difunta Annette Laming-Emperaire, de la École Pratique des Hautes Études de París, y uno de sus discípulos, Claude Couraud, analizaron los materiales en bruto utilizados para producir los pigmentos en polvo y localizaron las fuentes de esos minerales en esa parte de Francia. En segundo lugar, por sugerencia de Aimé Bocquet, del Centro de Documentación de Prehistoria Alpina, y bajo la dirección de R. Bouchez, del Centro de Investigación Nuclear de Grenoble, un grupo de investigadores emprendió el análisis tecnológico de los pigmentos pulverizados y de los métodos magdalenienses para prepararlos.

En tercer lugar, Pamela B. Vandiver, estudiante del Instituto de Tecnología de Massachusetts, bajo la dirección de William D. Kingery, ha aplicado la microscopía electrónica para estudiar escamas de pigmentos de varias pinturas de Lascaux. Las escamas se las proporcionó S. Delbourgo, del Museo del Louvre. Los descubrimientos de Vandiver están a punto de publicarse; algunos de sus resultados más interesantes los resumiremos más adelante.

En el primero de estos estudios, Laming-Emperaire y Couraud disponían de un total de 158 fragmentos de minerales que el abate Glory había encontrado en varios puntos de la cueva. Muchos de los fragmentos muestran arañazos y otras pruebas de desgaste intencionado. A juzgar por los fragmentos, los colores más estimados por los magdalenienses eran los negros (105 fragmentos), amarillos (26), rojos (24) y, en un cuarto lugar muy pobre, los blancos (3). Había notables variantes dentro de los negros, amarillos y rojos. Los negros, por ejemplo, iban desde un negro muy intenso hasta un gris oliváceo; los amarillos, del amarillo claro al amarillo rojizo y parduzco y, los rojos, desde el rojo parduzco y amarillento hasta el rojo claro y el rojo muy pálido. La colección del abate Glory contaba con algunos toscos "morteros" y "almireces" de piedra manchados por los pigmentos, que cabe suponer utilizaban los pintores para preparar sus colores. También incluía cierta cantidad de pie-



REPLICA DE UN CANDIL DE LASCAUX. No es más que una piedra del campo, con un hueco natural; tiene mechas de ramas de enebro y combustible de manteca. Aquí ilumina una pintura de la cueva.



CUERDA PALEOLITICA, de siete milímetros de diámetro, que estaba "fosilizada" en el Callejón de los Felinos. La calcita ha reemplazado a las fibras vegetales que se habían entrelazado para formar la cuerda; el fragmento, de 30 centímetros, conserva detalles del trenzado. Las agujas de hueso son útiles corrientes en el Paleolítico tardío, y se ha supuesto que se empleaban para tirar de alguna clase de "hilo". Sin embargo, no está claro si el hilo era de fibra vegetal, de tendón animal o de las dos cosas. El descubrimiento, en Lascaux, de una cuerda de fibra vegetal indica que esa fibra era de uso común hacia el 15.000 a. C.

dras, ahuecadas por agentes naturales, que aún contenían cantidades pequeñas de pigmento en polvo.

Para localizar la procedencia de los minerales, Laming-Emperaire y Couraud recurrieron a los datos de la prospección geológica oficial acerca de los yacimientos de óxido de manganeso (negros), óxido de hierro (rojos y amarillos) y caolín (blancos) conocidos en las proximidades de Lascaux. La fuente de manganeso más próxima, según los mapas del servicio geológico, se hallaba a 40 kilómetros al norte-noroeste de la cueva y la más próxima de caolín a 20 kilómetros al este. Había ocre rojo y amarillo a 20 kilómetros al este. El ulterior trabajo de campo de los dos investigadores localizó otros yacimientos mucho más cerca de Lascaux, que no figuraban en el mapa: un depósito de manganeso a cinco kilómetros de distancia y uno de ocre a sólo medio kilómetro.

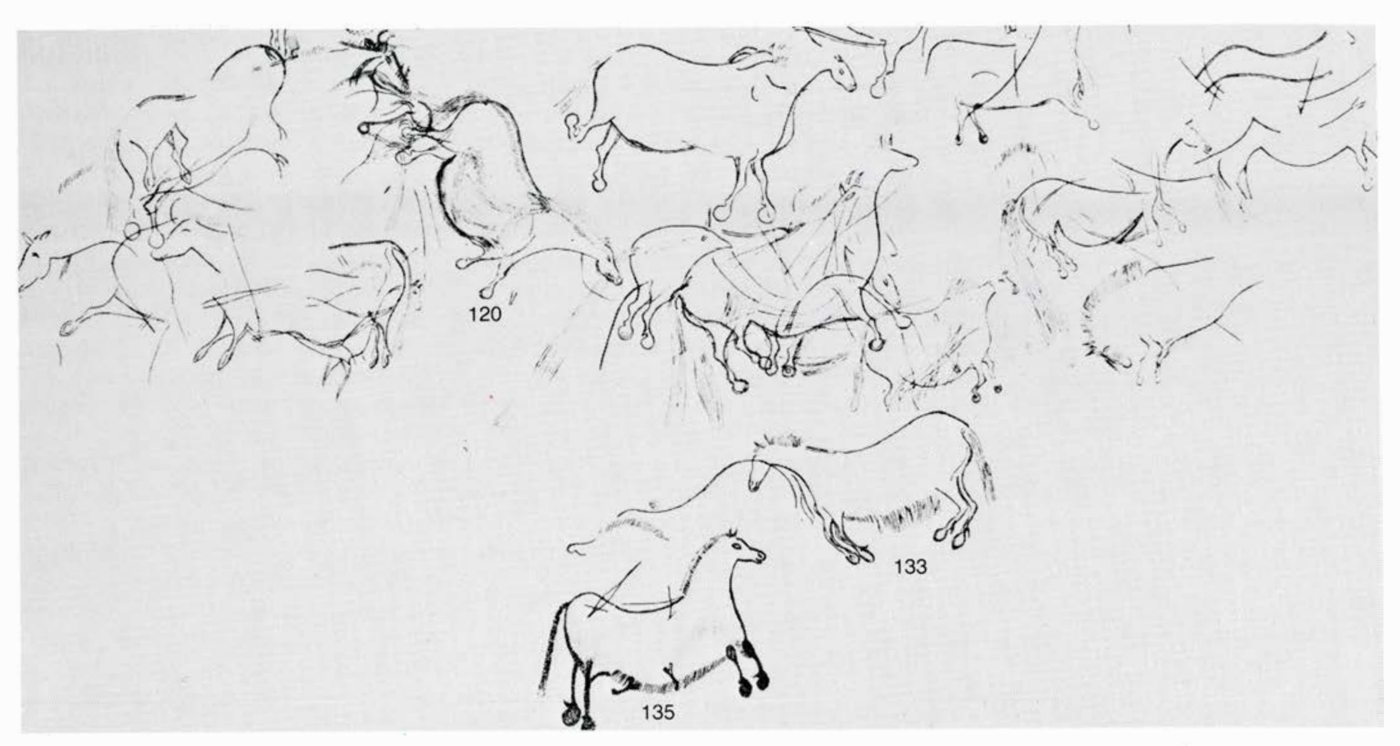
Seguidamente, Laming-Emperaire y Couraud prestaron atención a los procedimientos de pintar de los magdalenienses. Los experimentos demostraron que los pigmentos se habían preparado mezclando los polvos del mineral molido con el agua de la cueva, que tiene por naturaleza un elevado contenido de calcio que garantiza una buena adhesión y gran duración. Ulteriores experimentos mostraron cómo los pigmentos se aplicaban a la superficie de la roca. Laming-Emperaire y Couraud hicieron pinceles macerando puntas de ramas y atando pelo de bisonte en haces pequeños. Aplicaron pigmentos pulverizados directamente a superficies de piedra humedecidas y emplearon trozos de ocre como lápices para hacer el boceto inicial de una pintura.

Pronto averiguaron el mejor modo de sujetar los pinceles y comprobaron la eficacia de trasladar los colores a la piedra con una muñequilla. Por último, aplicaron pigmentos encima de otros pigmentos para comprobar los efectos de tales superposiciones. De este modo pudieron confimar lo que la fotografía con infrarrojos había indicado anteriormente, a saber: que las vacas rojas del Salón de los Toros se habían pintado antes que los grandes toros negros.

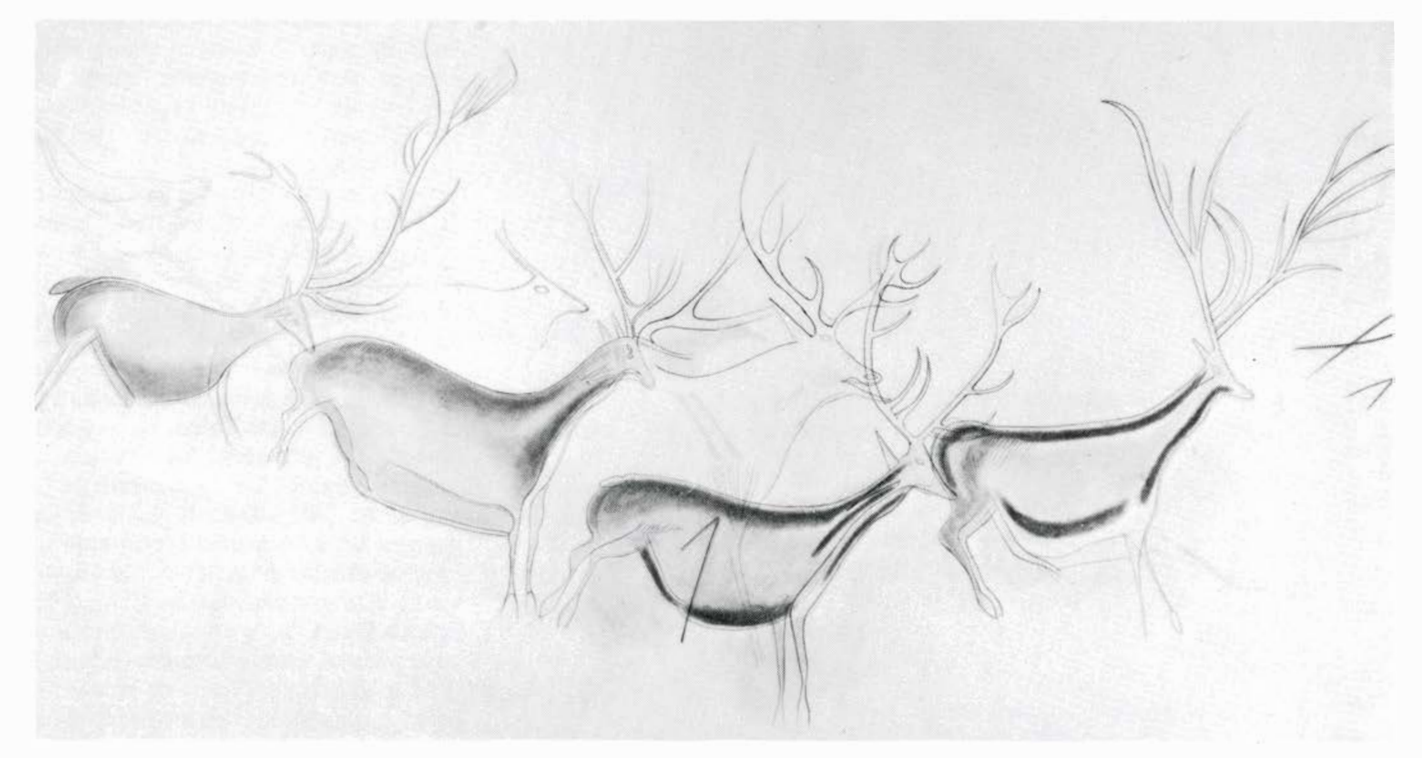
El grupo de Grenoble analizó 10 muestras de los pigmentos pulverizados recogidos por el abate Glory y una muestra más de un pigmento negro extraído de la superficie de un mortero. En cada una de las muestras determinaron cuáles eran los elementos químicos que contenían y los minerales concretos de que cada elemento procedía. Con

anterioridad a estos trabajos, se habían sometido a analisis trozos similares de pigmentos de una serie de pinturas del Paleolítico Superior, pero Lascaux es única en cuanto a suministrar los polvos con que los artistas de las cavernas preparaban sus colores. Por ello no sorprende que los trabajos del grupo de Grenoble hayan aportado una serie de nuevos datos.

Despunta entre éstos el hecho de que los pintores magdalenienses no sólo mezclaban los pigmentos para conseguir los colores y otros elementos que buscaban, sino que también sometían los pigmentos a procesos inesperados. Por ejemplo, el componente de un pigmento era fosfato de calcio, sustancia que obtenían calentando huesos de animales a una temperatura de unos 400 grados Celsius. Después mezclaban con



ANIMALES GRABADOS en el muro occidental del Pasadizo, que abarcan seis metros cuadrados. En total aparecen 32 animales, en parte o en su integridad, la mayoría de ellos caballos. Se ha empleado pintura para realzar a tres de los caballos (números 120, 133 y 135). Algunas cabezas de ganado y los cuartos traseros de un toro aparecen a la izquierda del centro. En el centro, y a la derecha del centro, aparecen colas agrandadas de tres caballos. Esta ilustración y la de abajo son calcos obtenidos por el abate André Glory. Sus calcos de los grabados llegaron a ocupar 117 metros cuadrados de papel.



DETALLE DE SEIS CIERVOS, todos ellos grabados, cuatro enteramente pintados además, y uno con realces del contorno hechos con pintura. El ciervo número seis, del que la cabeza, los cuernos y el lomo se distinguen apenas encima del ciervo pintado en segundo lugar a mano izquierda, tiene las astas menos exageradas. Las líneas angulares oscuras que se aprecian en el ciervo pintado en segundo lugar por la derecha pueden representar una flecha.

calcita el sulfato de calcio y volvían a calentarlo hasta alcanzar unos 100 grados, trasformándose la mezcla en fosfato de tetracalcita ($4CaO{\cdot}P_2O_5$).

Un pigmento blanco que a primera vista parece rojizo, por estar contaminada su superficie con ocre rojo, resultó no ser caolín puro, sino una mezcla de arcilla (10 por ciento), cuarzo pulverizado (20 por ciento) y calcita pulverizada (70 por ciento). Del mismo modo, mientras que el óxido de manganeso era el componente primordial de los pigmentos oscuros, el pigmento negro extraído del mortero resultó ser una mezcla de carbón (65 por ciento), arcilla rica en hierro (25 por ciento) y cantidades inferiores de otros minerales, cuarzo pulverizado incluido. También se había añadido arcilla a los ocres rojo y amarillo pulverizados, en proporciones que oscilaban entre el 20 y el 40 por ciento.

Los análisis de escamas de pigmento, realizados por Vandiver al microscopio electrónico, han proporcionado testimonios más detallados de la preparación y aplicaciones de los pigmentos en Lascaux. Para valorar la tecnología desarrollada por los artistas de Lascaux empleó también el análisis por rayos-X de energía dispersiva (EDAX), la difracción de rayos X y la petrografía óptica. Tales técnicas revelan que la microestructura de los pigmentos rojos difiere de la de los negros. Por ejemplo, los cristales de hematites de un pigmento de ocre rojo tienen una estructura característica laminada, mientras que los cristales de pirolusita de un óxido negro de manganeso son fibrosos o parecidos a agujas. Una parte importante del programa de Vandiver ha sido formar una colección de referencia de minerales naturales relacionados con los minerales de los pigmentos de la pintura de la cueva. Se está comparando la microestructura y composición de los pigmentos de Lascaux con las de las muestras naturales al objeto de estudiar la naturaleza y extensión del proceso a que los sometían los magdalenienses.

De las muchas contribuciones del abate Glory al estudio de Lascaux ninguna tiene mayor alcance ni importancia que su documentación sobre los 1500 grabados magdalenienses existentes en la cueva. La gama de su complejidad va desde las sencillas líneas rectas hasta representaciones de grupos enteros de animales. Estas figuras incisas se encuentran en el Pasadizo, en la Nave y particularmente en el Abside, donde no menos de 578 de ellas ocupan la totalidad del espacio disponible en la roca. Y es en estas mismas partes de la cueva donde han salido a luz 27 buriles de sílex, los útiles para grabar. Todos ellos delatan las mismas huellas de desgaste: en la punta con la que se trabajaba, el afilado ángulo original está suavizado y redondeado por el uso.

Las pinturas de Lascaux, especialmente las del Salón de los Toros y el Callejón Axial, se reprodujeron ampliamente en libros y revistas en los años siguientes a la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, los grabados, excepto los pocos que se distinguían con mayor claridad, llamaron apenas la atención. Así, centenares de obras de arte significativas del Paleolítico Superior permanecieron ignoradas salvo por los especialistas. La rectificación de ese abandono fue la tarea principal que se impuso Glory cuando, en 1952, el abate Breuil, cuya vista se estaba debilitando, recabó su ayuda. Glory adoptó una técnica, iniciada por Breuil, consistente en colocar láminas de plástico transparente sobre los grabados y calcar las líneas incisas en la superficie de éstas. Los calcos se trasladaban posteriormente a hojas de papel lo bastante grande para abarcar una composición completa. Los traslados de Glory llegaron a ocupar 117 metros cuadrados de papel.

Glory realizó otros muchos trabajos en Lascaux: excavación, colección de utensilios, fotografía. En los primeros años continuaba muchas veces sus investigaciones por la noche, cuando había cesado de discurrir la corriente de turistas, hasta un número de 1000 diarios en plena temporada. Sin embargo, su mayor tarea, la recopilación de los grabados, fue también la más importante. Desde el cierre de la cueva, en 1963, hasta la fecha de su muerte, Glory continuó preparando su enorme cúmulo de material gráfico con vistas a la publicación. Su trabajo ha proporcionado a los investigadores una base para el estudio del arte rupestre del Paleolítico Superior y de su simbolismo como no existe en ningún otro lugar, y que tal vez nunca se vea superada.

RENO GRABADO, de 70 centímetros de largo desde el hocico hasta la punta de la cola; se halla al borde de una composición del Abside, que incluye también un caballo amarillo pintado. Dos pezuñas traseras, y una parte pequeña de la cola de un caballo grabado, se superponen a la grupa y a la cola del reno. Esta copia de otro de los calcos del abate Glory aparece aquí algo simplificada en aras de la claridad.

Estructura y función de los cardúmenes de peces

La formación de cardúmenes sirve para reducir el riesgo de ser devorados. Los peces emplean sus ojos y sus líneas laterales para acomodarse a la velocidad y a la dirección que siguen los demás integrantes del banco

Brian L. Partridge

Quienquiera que observe un cardumen, o majal, de pejerreyes (peces de la familia Aterínidos) desplazándose lentamente sobre un arrecife en las claras aguas tropicales se preguntará por los mecanismos que subyacen a su conducta. Cientos de pequeños peces plateados se deslizan al unísono; diríase que lo que se mueve es un solo organismo, no una agrupación de ellos. El banco avanza perezosamente en línea recta y luego gira bruscamente; ni un solo pez se pierde del grupo. De pronto, una barracuda, escondida tras una masa de coral, arremete contra el banco; los miembros del cardumen salen disparados hacia afuera en una esfera que se expande. La expansión instantánea disuelve el cardumen en una fracción de segundo. Ni un solo pez choca con otro. Momentos después, los individuos dispersos se reúnen en pequeños grupos; el cardumen termina por formarse de nuevo y prosigue su lento pacer, mermado quizás en uno o dos de sus miembros.

Aunque la formación de cardúmenes en los peces es una de las formas más familiares de comportamiento social en los animales, hasta hace poco no se sabía gran cosa de ellos, en parte por las dificultades que comporta observar los minúsculos cambios de posición y de velocidad en un banco en condiciones naturales. Puesto que son numerosas las especies de peces que se congregan en cardúmenes, cabe suponer que ese comportamiento ofrece considerables ventajas evolutivas. Sin embargo, la comprensión en detalle de cómo se forma y se mantiene el cardumen no ha hecho más que empezar. Mis colegas y yo hemos abordado la cuestión registrando en cintas de vídeo bancos que nadaban en un gran tanque circular. Era creencia común que los peces mantenían su posición en el cardumen por medio de la visión. Nuestras investigaciones han demostrado que la línea lateral, un órgano sensible a los cambios transitorios en el desplazamiento del agua, es tan importante como aquélla.

Nuestro trabajo ha demostrado asimismo que el banco de peces no es una estructura geométrica regular, como pueda ser una red cristalina. En cada especie, cada individuo tiene una distancia y ángulo "preferidos" a su vecino más próximo. Sin embargo, la separación y el rumbo ideales no se mantienen de forma rígida. La distancia y la dirección reales varían mucho, aproximándose a los valores ideales únicamente sobre largos períodos. Resulta de ello una disposición probabilística que se parece más a una agregación al azar que a un entramado regular. No obstante, la tendencia de los peces a permanecer a la distancia y en el ángulo preferidos sirve para mantener la estructura. Cada pez, una vez establecida su posición, utiliza simultáneamente los ojos y las líneas laterales para medir la velocidad de los demás peces del cardumen. Luego ajusta su propia velocidad para que se iguale a una media ponderada que destaca la contribución de los peces cercanos. La combinación y la comparación de la información procedente de los dos sistemas sensoriales proporciona la base de todas las intrincadas maniobras del cardumen.

Aunque la mayoría de la gente tiene una idea intuitiva de lo que es un banco de peces, los estudiosos del comportamiento animal han dedicado mucho tiempo a definir la noción de forma precisa. ¿Constituyen dos peces un cardumen? ¿Y tres? Un banco compuesto por un millón de miembros, ¿está constituido por medio millón de parejas? ¿Hay un líder en el cardumen?

Diríase que media una importante diferencia cualitativa entre una pareja de peces y un grupo mayor. Mi análisis de cintas de vídeo de foxinos comunes (*Phoxinus phoxinus*) europeos nadando en un depósito demuestra que cuando hay dos peces, uno guía y el otro sigue. El que sigue ajusta su velocidad y su dirección para igualar las del guía; sin embargo, la velocidad y la dirección del guía no están influidas por los movimientos del seguidor. Cuando al depósito se añade un tercer foxino, la pauta cambia: en un grupo de tres o más peces ya no hay guía. Cada foxino ajusta su velocidad y orientación para que concuerde con la de todos los demás peces, ejerciendo los vecinos más próximos a un determinado pez la mayor influencia sobre éste. En cierto sentido, el banco en su conjunto es el guía, y cada individuo un seguidor.

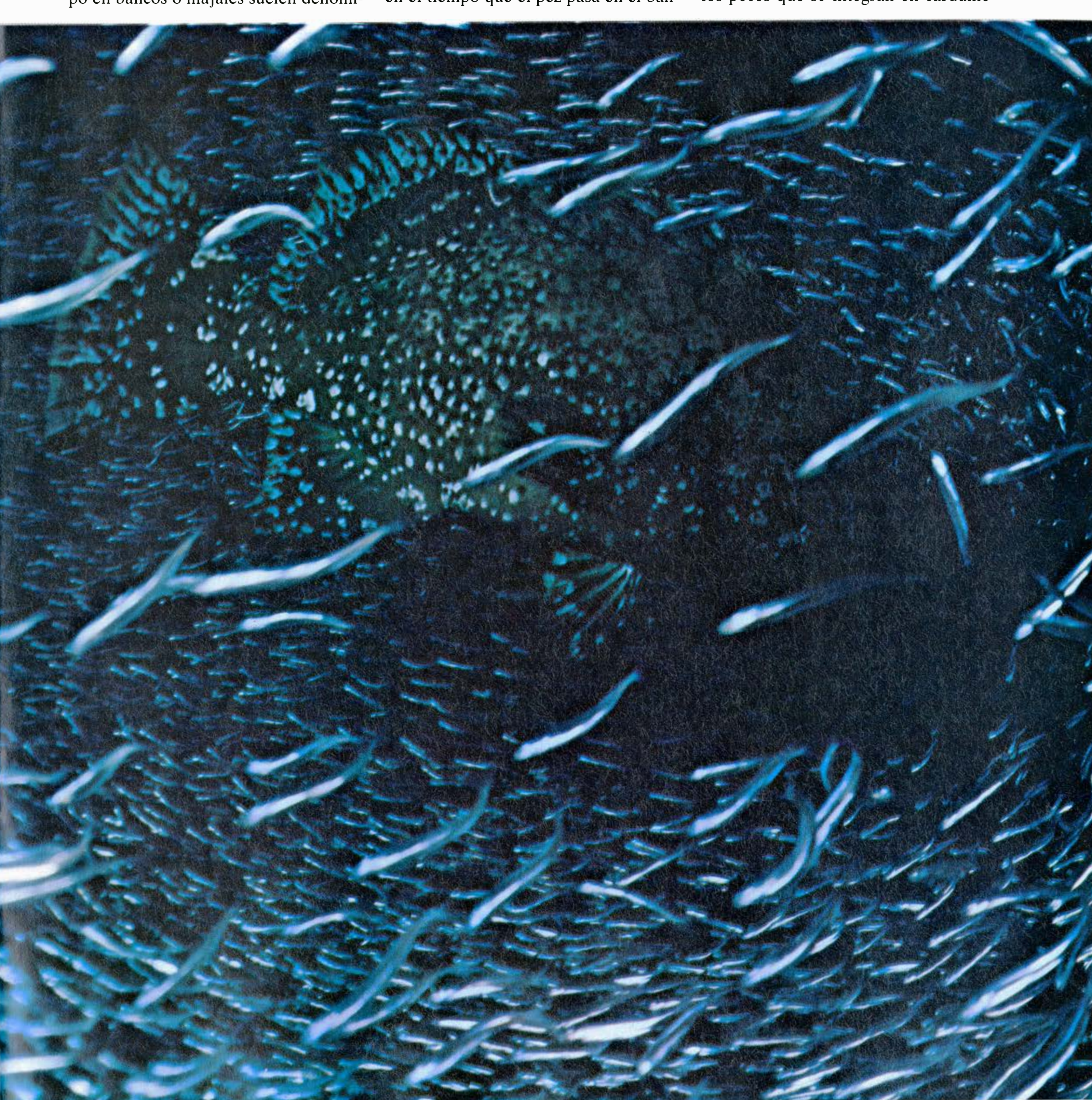
Una de las cualidades más sorprendentes de un cardumen de peces es su polarización: la disposición paralela de sus miembros. Se ha recurrido repetidamente a la polarización a la hora de definir el concepto de cardumen. Cuando los peces comen, con frecuencia forman un grupo laxo, con los miembros encarados en distintas direcciones. Sin embargo, cuando el banco se halla en movimiento, tiende a prevalecer la disposición polarizada. Además, si el cardumen sufre alguna amenaza, sus miembros suelen arrimarse unos a otros y alinearse más uniformemente

ATAQUE A UN CARDUMEN DE PEJERREYES en una cueva de los Cayos de Florida; el pez que ataca es un mero. Más de 10.000 especies de peces forman cardúmenes. En su mayoría se trata de individuos pequeños, que son presas y no depredadores. Para una presa, el valor adaptativo de formar cardúmenes reside en que reduce la probabilidad de su detección por parte de un depredador y disminuye la probabilidad de ser comida una vez detectado el banco. Como la fotografía sugiere, un modo por el que el cardumen reduce la probabilidad de ser devorado es confundiendo al depredador cuando éste realiza su ataque.

con sus vecinos. Que la polarización del cardumen sea más pronunciada bajo una amenaza sugiere alguna conexión de esa conducta con la ventaja adaptativa que confiere el comportamiento de formar cardúmenes.

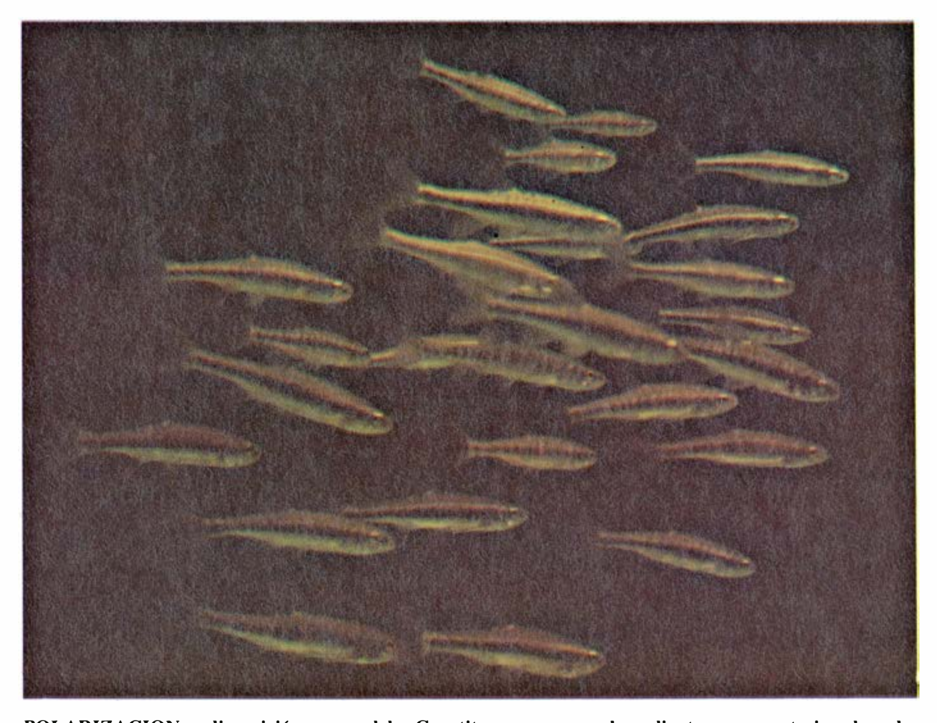
El papel que el cardumen desempeña en la vida de un pez varía mucho de una especie a otra. Las hay cuyos individuos pasan todo su tiempo o casi todo en un cardumen. En otras, los peces sólo se unen a los bancos de forma ocasional, mientras transcurren en solitario la mayor parte de su vida. Los peces que pasan todo o la mayor parte de su tiempo en bancos o majales suelen denominarse majaleros obligados; los que forman cardúmenes en algún momento, majaleros facultativos. En la mayoría de los trabajos de investigación sobre bancos de peces se daba por sentada la existencia de importantes diferencias entre cardúmenes obligados y facultativos. Mis estudios con foxinos y bacalaos (*Gadus morrhua*), que son majaleros facultativos, y con arenques (*Clupea harengus*), majaleros obligados, sugieren, por el contrario, que en estas tres especies el cardumen se forma y se mantiene según los mismos principios. La única diferencia estriba, al parecer, en el tiempo que el pez pasa en el banco. A partir de estas observaciones puede formularse una definición provisional útil de un cardumen: se trata de un grupo de tres o más individuos en el que cada miembro ajusta constantemente su velocidad y dirección para igualar las de los demás miembros del cardumen.

Evelyn Shaw, de la Universidad de Stanford, ha estimado que de unas 20.000 especies de peces, más de 10.000 se reúnen en cardúmenes durante alguna parte de su vida. Sin embargo, las especies que embancan no forman una muestra representativa. La mayoría de los peces que se integran en cardúme-



nes son pequeños; se ha pensado que la principal ventaja evolutiva de la formación de majales residirá en la protección que ofrece a estos pequeños peces frente a los depredadores.

Podría sospecharse que un cardumen formado por miles o incluso millones de peces, por pequeños que sean sus componentes, resultará muy visible; la verdad es que la probabilidad de que un depredador encuentre un banco no es mucho mayor que la probabilidad de que encuentre un pez aislado. La razón reside en el carácter óptico del medio en el que viven tanto la presa como el depredador. El contraste es extremadamente importante para distinguir un objeto del fondo general sobre el que se encuentra. En una gran masa de agua, la dispersión de la luz por las partículas en suspensión y la absorción de la luz por la misma agua reducen mucho el contraste. En consecuencia, incluso en aguas de claridad excepcional, la mayor distancia a la que puede verse un objeto es de unos 200 metros, y esa distancia no depende del tamaño del objeto. En la práctica, la distancia máxima es mucho menor. (Los escafandristas consideran que una visibilidad de 30 a 50 metros es excepcionalmente buena.)

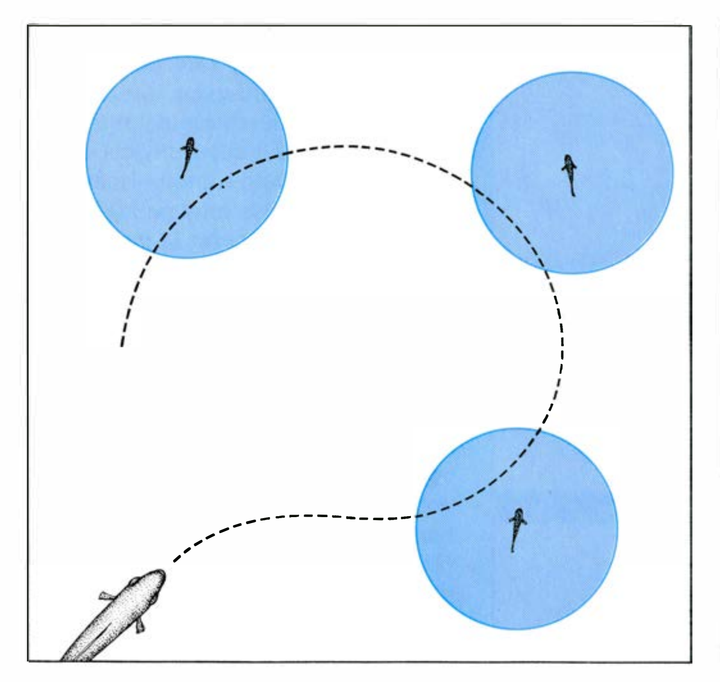


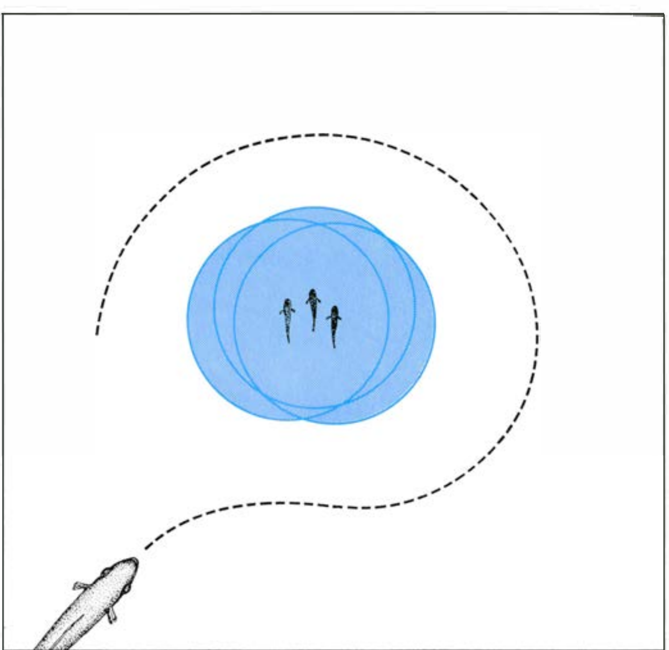
POLARIZACION, o disposición en paralelo. Constituye un rasgo sobresaliente que caracteriza al cardumen. Cuando el banco es amenazado se polariza más y los peces se apiñan con densidad mayor. Este efecto se muestra en fotografías de foxinos (*Phoxinus phoxinus*) europeos en un acuario. En la fotografía superior, los foxinos proceden sin miedo; la fotografía de abajo los muestra poco después de que en el acuario se colocara un lucio, un pez depredador. Los cardúmenes de algunas especies están de ordinario más polarizados que los de otras especies, hecho que antes se tomó como peculiaridad diferenciadora. En la actualidad se cree, en cambio, que todos los bancos se organizan según los mismos principios.

Considérense tres peces que nadan muy juntos en un banco elemental. La zona en que puede detectarse cada pez viene definida por una esfera cuyo radio es la máxima distancia de visibilidad. Puesto que los peces se hallan en un grupo compacto, las esferas se superponen en gran medida. La probabilidad de que un depredador encuentre el cardumen será, pues, levísimamente superior a la probabilidad de que encuentre a un pez solitario. En realidad, la probabilidad de que un depredador encuentre el banco es alrededor de un tercio de la probabilidad de que encuentre uno cualquiera de los tres peces si éstos estuvieran separados.

El ejemplo del cardumen con tres peces puede parecer trivial. Pero en pleno océano la probabilidad de que un depredador dé con un cardumen de 1000 individuos es sólo ligeramente superior a la probabilidad de encontrar un ejemplar sin compañía. Si el depredador, al descubrir el banco, se come uno, la probabilidad que un determinado pez tiene de ser comido es aproximadamente una milésima parte de la que tendría si la presa hubiera sido descubierta en solitario. Así, la ventaja que confiere estar en un cardumen es sustancial, y parece que aumenta con el tamaño del banco.

Sin embargo, varias consideraciones sugieren que para que el banco haya florecido como forma social a lo largo de una prolongada historia evolutiva debe proporcionar algún beneficio adicional al de reducir la probabilidad de detección. Una observación que confunde es que algunos peces forman cardúmenes incluso en presencia de depredadores, cuando se ha perdido toda posibilidad de escapar a la detección. Benoni H. Seghers, de la Universidad de Ontario occidental, ha demostrado que hay tantos depredadores en las corrientes fluviales de Trinidad que los gupis (*Lebistes reticulatus*) se encuentran constantemente a la vista de aquéllos. Aun así, los gupis continúan embancando. Además, sus rutas diarias hacia los lugares de alimentación y desde ellos los hacen pasar frente a muchos depredadores. Muchas especies de peces que viven en los arrecifes coralinos en aguas de las costas de Florida pasan toda su vida a muy pocos metros





LA PROBABILIDAD DE DETECCION se reduce al agruparse en cardumen. Debido a la dispersión y a la absorción de la luz en el océano, la mayor distancia a la que un objeto de cualquier tamaño puede verse se cifra en los 200 metros; el máximo real suele ser mucho menor. En el esquema, los círculos representan la mayor distancia a la que puede verse un pez aislado. La ilustración muestra la situación desde arriba; naturalmente, en el océano los radios formarían esferas. Si hay tres peces separados entre sí, la probabilidad de que un depredador encuentre al menos a uno de ellos es bastante grande (*izquierda*). Si los tres peces forman un banco, los círculos que representan la máxima distancia de visibilidad se superponen en gran medida (*derecha*). Por ello, la probabilidad de que un depredador encuentre el cardumen es sólo de un tercio, aproximadamente, de la probabilidad de encontrar uno cualquiera de los peces aislados. Si, al hallar el banco, el depredador se comiera a sus tres miembros, no habría habido ningún beneficio en embancar. Por esta razón, la formación de cardúmenes debe también reducir, de algún modo, la probabilidad de que un pez caiga después de que un depredador aviste el majal.

de barracudas (esfirénidos) y meros (serránidos) carniceros; lo que no impide que la formación de cardúmenes sea un fenómeno común entre las especies presa. Es evidente que la imagen de unos depredadores recorriendo un océano sin límites en busca de presas escasas no puede explicar estos cardúmenes.

Además, el cardumen debe ser al menos ligeramente más conspicuo que un pez aislado. De ahí se sigue que un individuo podría reducir sus probabilidades de detección abandonando el banco. La persistencia de éste sugiere que continúa teniendo valor para sus miembros, incluso después de haber sido detectado.

Otro punto débil de la teoría de la "detección" nos lo descubre una nueva mirada atenta al cardumen de tres peces. Aunque el grupo no es mucho más fácil de encontrar que un pez aislado, la supervivencia de cada uno de los peces no aumenta necesariamente. Supóngase que cuando un depredador da con el banco se come a sus tres integrantes; ninguna de las presas habrá conseguido una ventaja por hallarse en el cardumen. Por otro lado, si el banco fuera tan grande que un depredador no pudiera consumir todos los peces, sí habría cierta ventaja.

Aun cuando pudiera establecerse que, por término medio, sobreviven más peces cuando éstos nadan en un cardumen, de ello no podría deducirse que la formación de majales aporte ventaja alguna para un pez en concreto. La selección natural actúa sobre el individuo y, en general, no hay beneficio para éste cuando se aumenta el bienestar de otros miembros del grupo. Hay, empero, circunstancias excepcionales en las que el comportamiento que beneficia al grupo puede verse favorecido por la selección, a saber, cuando los miembros del cardumen se hallan estrechamente emparentados. Si un individuo tiene muchos genes en común con los demás peces de un cardumen, la supervivencia de éstos tiende a perpetuar los propios genes del individuo.

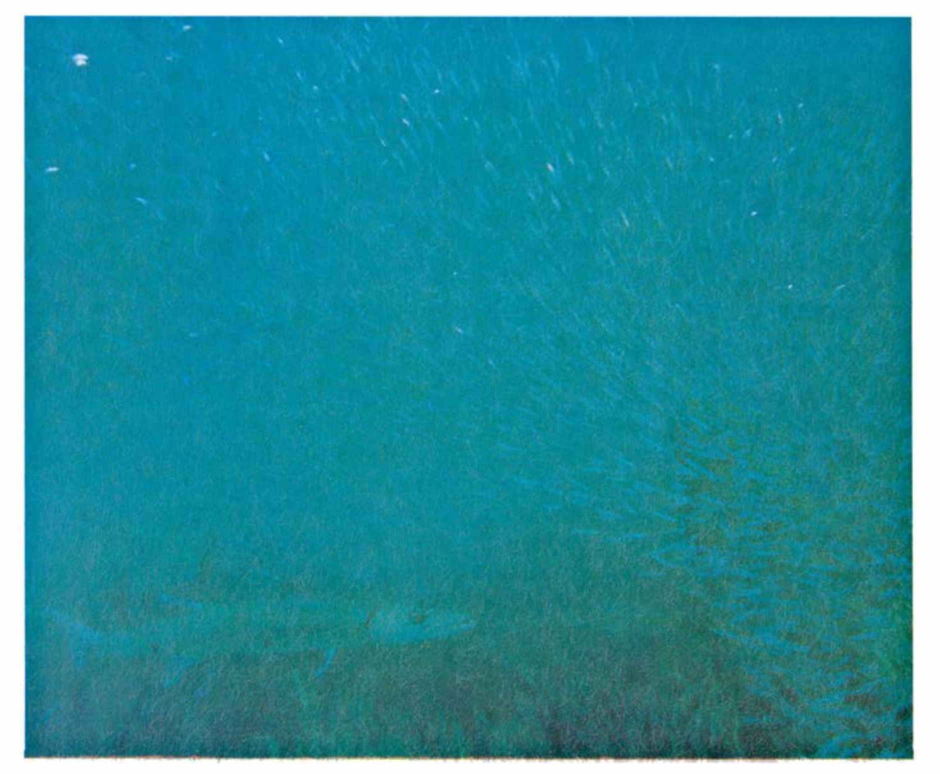
Mediante el análisis de la estructura de enzimas que pueden presentar varias formas químicas, Moira Ferguson y David L. G. Noakes, de la Universidad de Guelph en Ontario, han demostrado que los ciprinos dorados (*Notemigonus chrysoleucas*, una especie de agua dulce) de un cardumen cualquiera se hallan más estrechamente emparentados entre sí que con los miembros de otros bancos. De ahí que el mecanismo de "selección de parentesco" opere, a buen seguro, en esta especie. Por contra, es probable que exista poca semejanza genética entre los peces oceánicos que forman un cardumen, pues las larvas de progenitores distintos se entremezclan cuando flotan libremente.

Parece que en muchas especies la formación de cardúmenes sólo puede ofrecer una ventaja evolutiva importante si reduce la probabilidad de que un individuo sea comido una vez que el banco ha sido localizado. Esto puede conseguirse de varias maneras. Albert Eide Parr, uno de los primeros investigadores que aplicaron métodos cuantitativos al estudio de los cardúmenes, observó que un banco se halla más densamente empaquetado y más fuertemente polarizado cuando sufre un ataque. Según Parr, los peces de aguas abiertas responderían a la falta de refugio en el océano escondiéndose unos detrás de otros, formándose así el cardumen. También se ha sugerido que un depredador puede percibir un grupo denso de pequeñas presas como si se tratara de un objeto grande y aterrador; pero cabría esperar que la selección natural favoreciera a los depredadores que no cayeran en ese engaño.

Una explicación más plausible del valor adaptativo del cardumen densamente apretado es que reduce la probabilidad de que el depredador consiga atrapar una presa. Un depredador que se enfrenta a un gran número de presas suele tener dificultades a la hora de decidirse por el individuo a atacar. Se ha denominado al fenómeno efecto de confusión; puede resultar de dos procesos completamente distintos. Un proceso tiene lugar en el sistema nervioso



CARDUMEN DE PECES DEPREDADORES que nadan en una formación parabólica, con la parte cóncava de la parábola orientada hacia delante. Se trata de atunes (*Thunnus thynnus*) gigantes. La fotografía fue tomada por el National Marine Fisheries Service de los Estados Unidos dentro de una campaña de censo de la población de túnidos. Se sabe desde hace tiempo que varios depredadores, túnidos y barracudas incluidos, se congregan en cardúmenes. Y se suponía que el hecho de embancar no tenía otro objetivo que aumentar el área visual de los depredadores: si un pez encontraba presas, los otros podían añadirse a la cacería. El análisis que el autor ha realizado del cardumen de atunes sugiere una estrategia de captura mucho más cooperativa. Los atunes actúan aparentemente al unísono para conducir a los bancos de las presas entre los extremos más sobresalientes de la parábola, y luego rodean y destruyen a las presas.



TACTICAS EVASIVAS empleadas por los cardúmenes de presas, que se muestran aquí y en las dos ilustraciones de la página opuesta. La fotografía presenta un banco de arenques enanos (*Jenkinsia lamprotaenia*) formando una vacuola alrededor de una barracuda. La táctica adoptada depende de la velocidad con que se acerca el depredador. La barracuda, cuyo cuerpo tiene forma de torpedo y dispone de un par de aletas verticales cerca de la cola, se halla bien adaptada a una acometida rápida, pero no a la natación sostenida a alta velocidad. Se aproxima furtivamente a sus víctimas potenciales antes de arremeter contra ellas. Al tiempo que la barracuda se desplaza lentamente hacia el banco, los arenques enanos forman la vacuola, manteniendo una distancia suficiente para escapar si el depredador ataca.

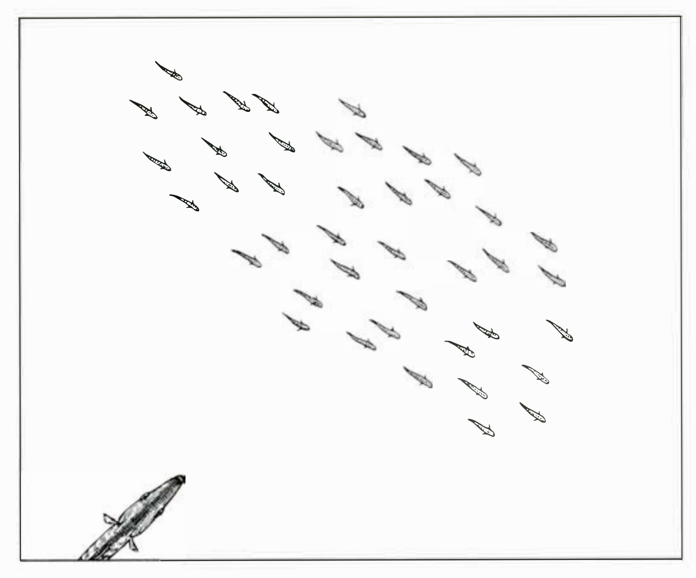
central: el depredador, simplemente, no puede hacer una elección entre los miembros del cardumen. Muchos depredadores prefieren acometer a presas que se distinguen del resto del cardumen por su aspecto o comportamiento. Diferencias incluso muy pequeñas son suficientes para superar la incapacidad del depredador para tomar una decisión, pero en muchos cardúmenes los peces son de aspecto casi idéntico, y al depredador puede resultarle difícil decantarse por uno.

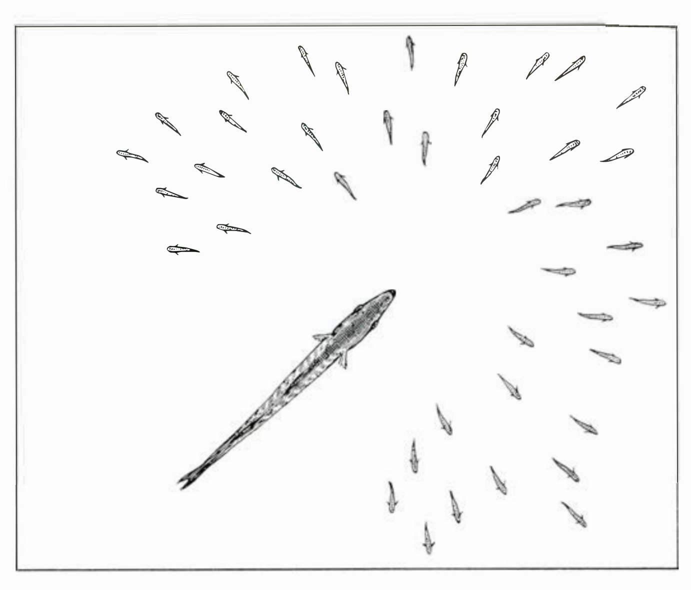
El segundo proceso quizá tenga su origen en el sistema nervioso periférico. Es la confusión sensorial producida por un gran número de presas que se mueven alrededor del depredador. Supongamos que el depredador se ha fijado ya en su presa potencial; el movimiento de otros individuos por las inmediaciones distraerá su atención. El depredador se encuentra como aquel tenista que intenta golpear dos pelotas a la vez.

Considero más probable que el mecanismo responsable del dilema del depredador sea el de confusión sensorial que el de indecisión. Si realmente no existieran criterios fidedignos para seleccionar un pez al que atacar, la selección natural favorecería a depredadores que eligieran al azar y rápidamente. Por otro lado, la confusión sensorial es consecuencia indirecta de la sensibilidad de percepción al movimiento. Debe existir una fuerte presión selectiva en contra de que un depredador desarrolle detectores de movimiento menos sensibles, porque son necesarios para la búsqueda de presas.

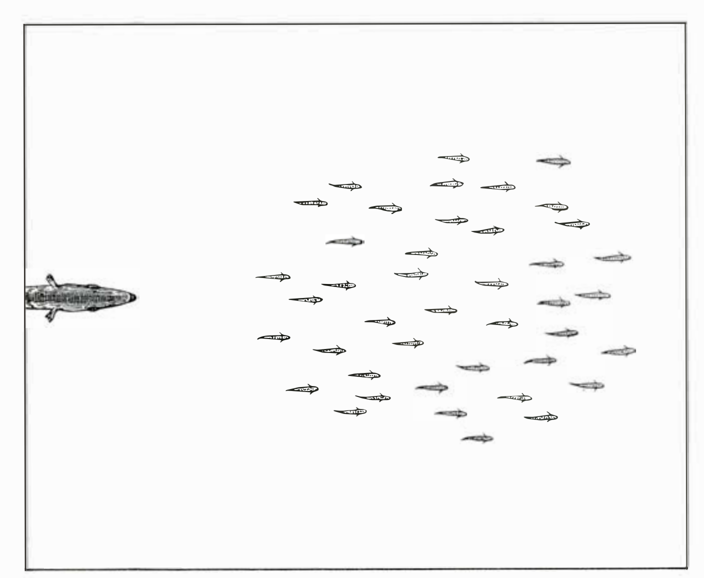
Sea cual fuere el mecanismo, existen pruebas suficientes de que los cardúmenes confunden a los depredadores. Sean Neill y Michael Cullen, de la Universidad de Oxford, han estudiado los ataques efectuados por lucios (*Esox* sp.) y percas (*Perca* sp.) a cardúmenes de alburnos (*Alburnus alburnus*) y leuciscos comunes (*Leuciscus leuciscus*), que son peces de agua dulce europeos. Al aumentar el número de presas de una a seis y luego a 20 se reducía la frecuencia de las arremetidas de los atacantes y la probabilidad de éxito.

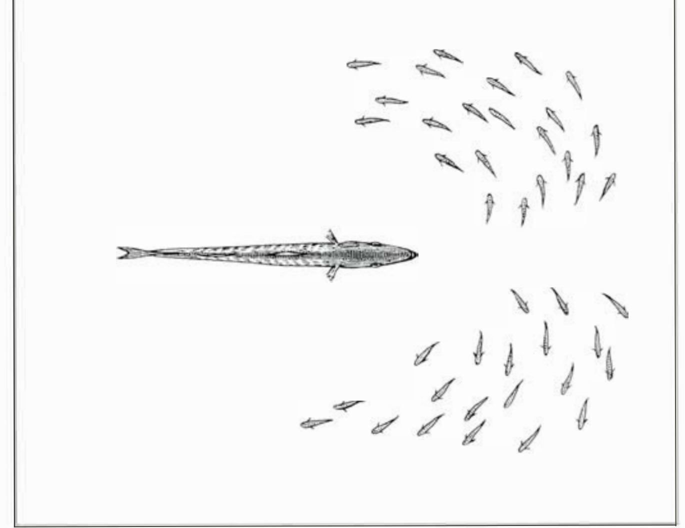
Al disminuir la probabilidad del depredador de encontrar presas y confundir al depredador cuando da con ellas, el cardumen ampara a todos sus miembros. Las ventajas comentadas hasta aquí pueden atribuirse a la forma del propio cardumen; más incluso que a la cooperación activa de sus miembros. Pero si cooperan, los componentes reducirán aún más la probabilidad de ser devorados.

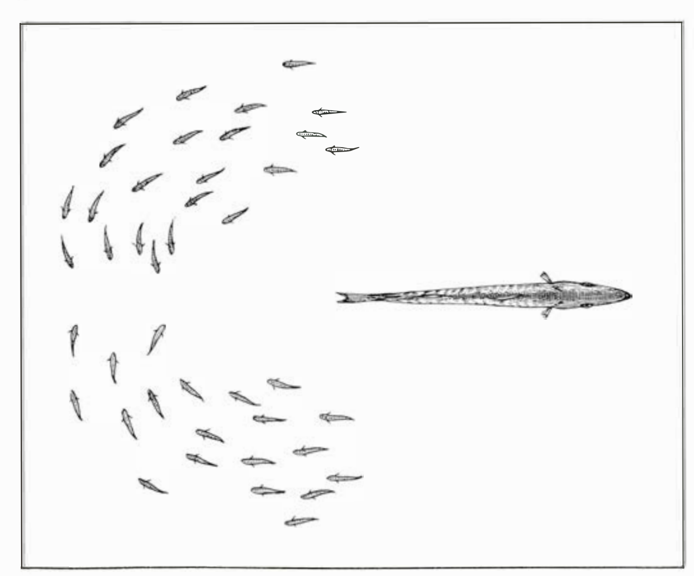


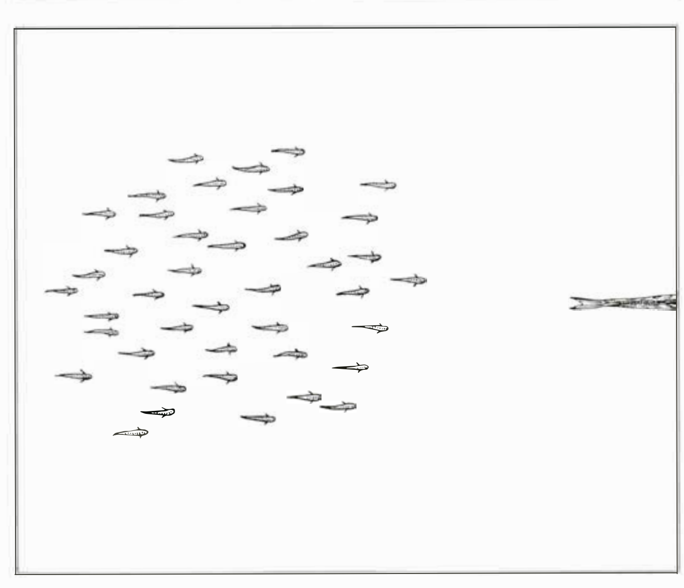


EXPANSION INSTANTANEA de un cardumen de arenques enanos; es la más espectacular de las tácticas evasivas que emplea esta especie. Cuando la barracuda arremete contra el majal, el banco se expande en forma de esfera. Toda la expansión puede tener lugar en sólo medio segundo; se consigue mediante un único movimiento de la cola por parte de cada miembro del cardumen. Nunca se han observado colisiones en el curso de una expansión si los peces conservan todos sus órganos sensoriales intactos; diríase, pues, que cada individuo debe "saber" hacia dónde irán sus vecinos en caso de ataque.

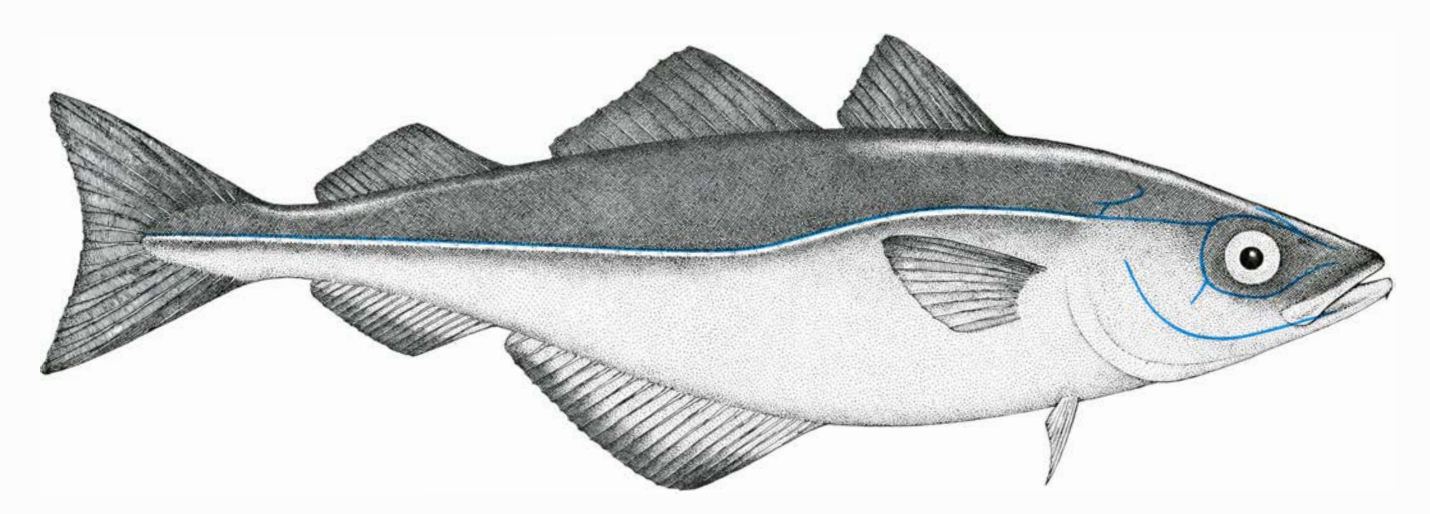








EFECTO DE SURTIDOR, que permite a un cardumen de presas pequeñas y lentas maniobrar mejor que un depredador al que no ganan en velocidad. Cuando una barracuda se acerca a un banco de arenques enanos, éste se escinde y fluye en dos grupos hacia la cola del pez mayor, que se desplaza hacia delante por su propio impulso. Los grupos se funden en un nuevo majal detrás del agresor. Si el depredador se da vuelta, la maniobra se repite.



LINEA LATERAL, órgano sensible a los desplazamientos transitorios del agua y que proporciona al pez información para mantener su posición en un cardumen. El canal de la línea lateral se indica en color sobre el dibujo de un abadejo negro (*Pollachius virens*), un pez marino estrechamente emparentado con el bacalao. La línea lateral está compuesta por canales gelatinosos conectados mediante poros al medio externo. Dentro del canal se encuentran miles de células apicales que guardan gran semejanza con los receptores de sonido del oído de un vertebrado terrestre. La respuesta de las células apicales al desplazamiento del agua proporciona al abadejo negro información acerca de la velocidad y la dirección de los peces que le rodean. Las investigaciones del autor han demostrado que los peces que forman bancos comparan la información procedente de los ojos con la que proviene de las líneas laterales.

Los bancos de peces se libran a varias maniobras evasivas espectaculares. La táctica adoptada depende en parte de cuán rápidamente se acerque el depredador. Pueden ilustrarse estas tácticas por las respuestas de varias especies presa a la barracuda (*Sphyraena*), un depredador común de los majales de peces pequeños de aguas tropicales. La barracuda ha desarrollado una forma bien adaptada para una rápida acometida, que es su ataque característico. Tiene un largo cuerpo torpediforme con un par de aletas verticales cerca de la cola. En una arremetida, las aletas actúan de segunda cola, proporcionando un poderoso impulso hacia delante. Esta conformación corporal no es la más idónea para una natación sostenida de alta velocidad. La barracuda tiende a acercarse furtivamente a su presa y luego acometer en un solo movimiento.

Cuando la barracuda se aproxima lentamente al cardumen, las presas pueden retroceder creando una cavidad en su derredor. Sin embargo, lo más frecuente es que el cardumen se escinda en dos partes frente al depredador. Las dos mitades del banco nadan hacia fuera, giran, nadan alrededor de la barracuda y se vuelven a unir una vez sobrepasada. Geoffry Potts, del laboratorio de la Marine Biological Association de Plymouth, Inglaterra, ha llamado a esta táctica efecto de surtidor. Tras la maniobra, el depredador queda con el cardumen a su espalda. Si la barracuda se vuelve, el proceso se repite. Esa sucesión de movimientos permite al banco librarse de un depredador al que no ganaría por velocidad.

Cuando la barracuda arremete, de poco sirven maniobras tan imponentes como el efecto de surtidor. Ante una rápida acometida, los peces salen disparados, radialmente, desde el centro del banco, impulsados por un único golpe de cola. El movimiento se parece a la explosión de una bomba. En un santiamén (un quinto de segundo) los peces aceleran desde una situación de partida estacionaria hasta una velocidad de entre 10 y 20 longitudes del cuerpo por segundo. La expansión completa puede tardar medio segundo.

Puesto que la expansión resulta de movimientos caudales aproximadamente simultáneos en todo el cardumen, no parece que esté coordinada por algún sistema en el que los peces registren los movimientos de sus vecinos. Con toda probabilidad, cada miembro del cardumen "sabe" hacia dónde irán sus compañeros en caso de ataque. Un cierto apoyo a esta hipótesis lo proporciona el hecho de que nunca se han observado colisiones en peces que tuvieran todos sus órganos sensoriales intactos.

Aunque la mayoría de los estudios realizados sobre bancos de peces hacen referencia a especies que son consumidas y no a especies consumidoras, también algunos depredadores forman cardúmenes; entre ellos están las barracudas y los atunes. Durante mucho tiempo se ha supuesto que, cuando los depredadores embancan, actúan en mayor o menor grado como un grupo de cazadores solitarios. Formar un cardumen puede, con todo, tener una ventaja adaptativa por aumentar la zona de búsqueda del cazador. Si un miembro del cardumen encuentra alimento, los demás pueden aprovecharse del hallazgo. Si los miembros del cardumen se mantienen en una posición en la que apenas pueden verse unos a otros, la zona de búsqueda se halla en su máximo. Esta es una forma de caza mucho más laxa e individualista que la que se ve en los leones o los lobos, en los que la manada abate conjuntamente a la presa, o en los delfines, que conducen a sus presas hacia aguas someras.

La observación de ciertos hechos me ha infundido la sospecha de que hay, entre los peces, depredadores que coordinan su caza de forma cooperativa. He analizado la estructura de cardúmenes de atunes (*Thunnus thynnus*) gigantes (peces que alcanzan hasta tres metros de longitud y más de 400 kilogramos de peso). Fotografías aéreas de bancos de atunes realizadas por el National Marine Fisheries Service de los Estados Unidos para censar la población de atunes muestran que la disposición de estos peces en el cardumen es notablemente regular.

Los bancos de atunes de 50 o más miembros pueden dividirse en grupos más pequeños cuando cazan. Los bancos más reducidos constan de 10 a 20 peces, dispuestos en curva, casi en parábola, con el lado cóncavo hacia delante. Conseguir un espaciamiento regular de los individuos a lo largo de una parábola es una meta difícil, porque la distancia y el ángulo entre cada par de atunes son diferentes. Puesto que la forma del cardumen se mantiene a pesar de esta dificultad, cabe suponer que proporciona considerable ventaja en la caza.

La posible naturaleza de la ventaja puede explicarse mediante una analo-

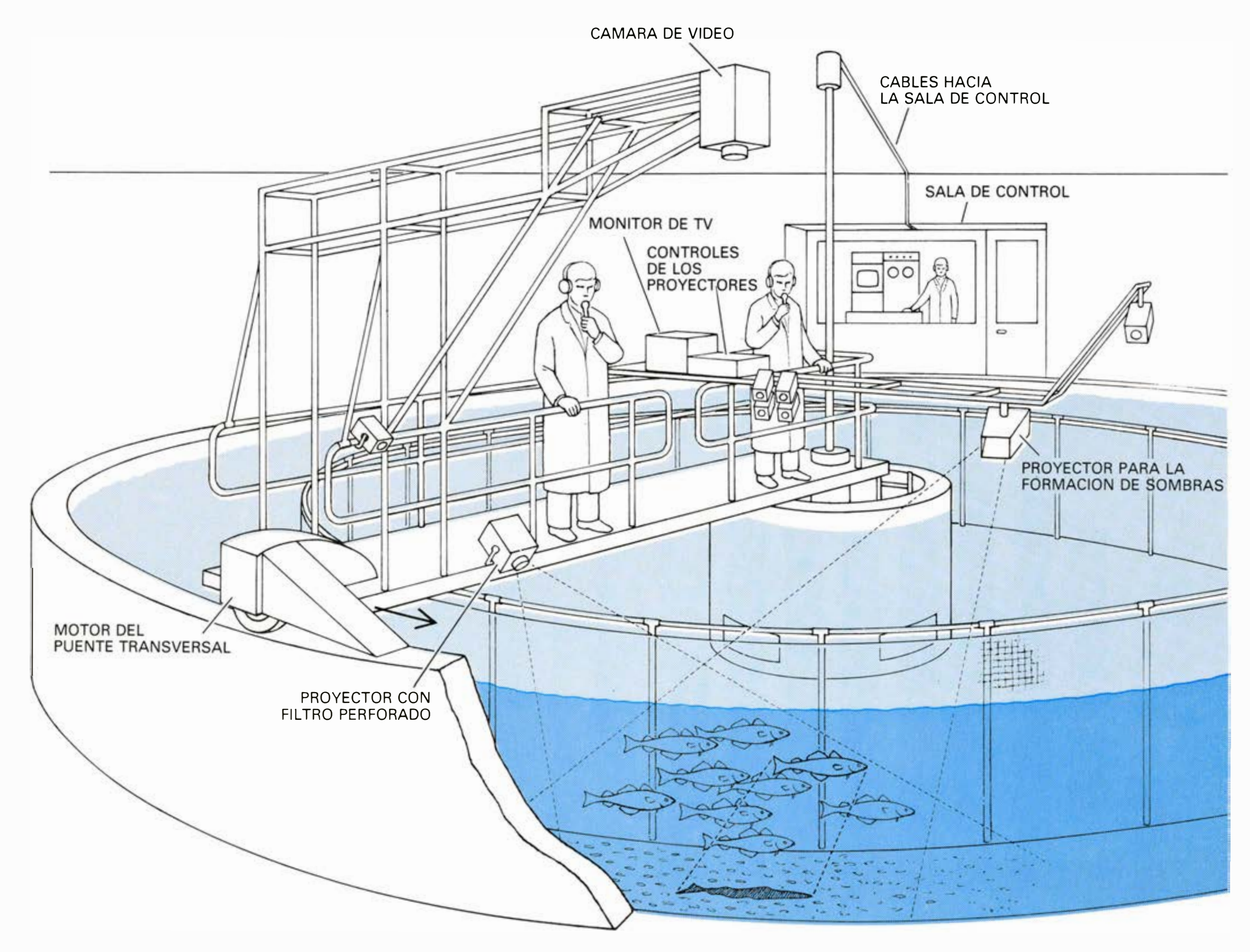
gía con el funcionamiento del espejo parabólico de un telescopio. Cualquier rayo luminoso paralelo al eje de la parábola se refleja en la superficie cóncava hacia el foco. Quizás ocurra algo similar cuando un cardumen parabólico de atunes nada en paralelo a su propio eje. Si las presas reaccionan frente al banco curvado como lo harían frente a una pared, se dirigirán al foco de la parábola, que es el lugar más idóneo para que los atunes las rodeen y las consuman.

Así pues, tanto para las presas como para los depredadores, el valor del cardumen depende de la capacidad que detenten sus miembros en la coordinación precisa de sus movimientos. La ventaja deriva, hasta cierto punto, de la forma geométrica del cardumen; pero influyen, sobre todo, las tácticas que el cardumen emplea. Además, el valor adaptativo del banco aumenta con su tamaño. Como resultado de estos factores evolutivos, no son raros los cardúmenes con un millón de miembros.

¿Cómo se organiza un grupo tan numeroso? Sólo podíamos responder a la cuestión disponiendo de algún medio para registrar, durante un período largo, hasta los menores cambios de posición de los peces del cardumen. El registro nos lo permitió un montaje único que el Departamento escocés de Agricultura y Pesca tiene en Aberdeen. El laboratorio ictiológico del departamento tiene un depósito circular de 10 metros de diámetro y un metro de profundidad. Al poner una valla de plástico en el depósito se obtenía un canal de un metro o metro y medio de ancho, según el experimento.

En el centro del tanque circular hay un montante del que surge un puente transversal giratorio de cinco toneladas. Este puente transversal sostiene, si es preciso, a dos observadores y numerosos aparatos. Desde el puente proyectamos una serie de puntos luminosos sobre el suelo del depósito. Puede entrenarse a un cardumen de peces a permanecer sobre una mancha luminosa de ese tipo. Cuando se colocaba un cardumen en el depósito, los primeros días se dedicaban a habituar a los peces a que permanecieran sobre la mancha cuando el puente transversal se movía alrededor del depósito.

Puesto que el cardumen es una estructura tridimensional, hay que examinar tanto las relaciones verticales como las relaciones horizontales que ocurren en su seno. A tal fin, montamos en el puente un segundo proyector; su luz se dirigía hacia abajo, en ángulo, a través del cardumen. Cuando éste se observaba desde arriba, la distancia entre un pez y su sombra indicaba la altura del ejemplar sobre el fondo.



CARDUMENES DE PECES en el laboratorio, estudiados por el autor mediante aparatos del Departamento de Agricultura y Pesca de Escocia en Aberdeen. El depósito circular tiene 10 metros de diámetro; mediante una valla de plástico se creaba un canal circular de 1,5 metros de anchura. El puente transversal que surge del montante central sostenía una cámara de vídeo, otros aparatos y a los observadores. Se entrenaba a bancos de 20 a 30 peces (con números marcados en su costado) a permanecer sobre una mancha de luz moteada proyectada por un foco desde el puente transversal. Cuando éste giraba a una velocidad constante, el cardumen avanzaba para mantener su posición con respecto al punto luminoso. Desde el montante se proyectaba diagonalmente un haz de luz roja a través del cardumen. Vista desde arriba, la distancia entre un pez y su sombra en la mancha roja indicaba la profundidad de aquél. Se grabaron cintas de vídeo y un observador detallaba las posiciones de los peces. Utilizando una computadora se obtuvo un gráfico de las coordenadas de cada pez en las sucesivas imágenes de la cinta de vídeo; así se recabó información sobre el ajuste de la posición que ocurría en el cardumen.

En el puente se montó una cámara de vídeo; mientras el puente seguía al cardumen, la cámara registraba las posiciones horizontales de los peces; las distancias a las respectivas sombras indicaban las profundidades. Valiéndonos de un ordenador registramos, en cada imagen de la cinta magnética, la posición de cada individuo en el espacio tridimensional. Se analizaron más de 35.000 imágenes, que proporcionaron la más detallada información sobre cardúmenes jamás obtenida. La mayor parte de las investigaciones anteriores se habían basado en la observación visual o bien en no más de unos pocos cientos de fotogramas de película.

Además, un observador instalado en el puente cuando éste seguía al cardumen comentaba las posiciones de los peces; los comentarios se sincronizaban luego con la cinta de vídeo. Para facilitar el análisis de la cinta marcamos los peces con números. A un costado del pez se aplicaba una marca metálica fría, que imprimía temporalmente una señal. Utilizando esta disposición, mi colega Tony J. Pitcher y yo observamos bancos de bacalao, arenque y un tercer pez muy parecido al bacalao, el abadejo negro (*Pollachius virens*). En la mayoría de los casos, los cardúmenes constaban de unos 20 individuos.

Uno de los conceptos erróneos más persistentes acerca de los cardúmenes de peces es el de creer que poseen una forma geométrica regular, como el entramado característico de los cristales. No se ha observado una forma regular de ese tipo en los bancos de ninguna especie. Nuestros estudios muestran que la estructura es más bien laxa o probabilística, y que resulta de la aplicación, por cada pez, de unas pocas y simples reglas de comportamiento. La primera regla dice que cada individuo mantiene a su alrededor un espacio vacío. Para cada especie existe una distancia de acercamiento mínimo característica, que no violan los vecinos. La distancia absoluta depende del tamaño del pez; por lo general es de unas tres décimas de la longitud del cuerpo.

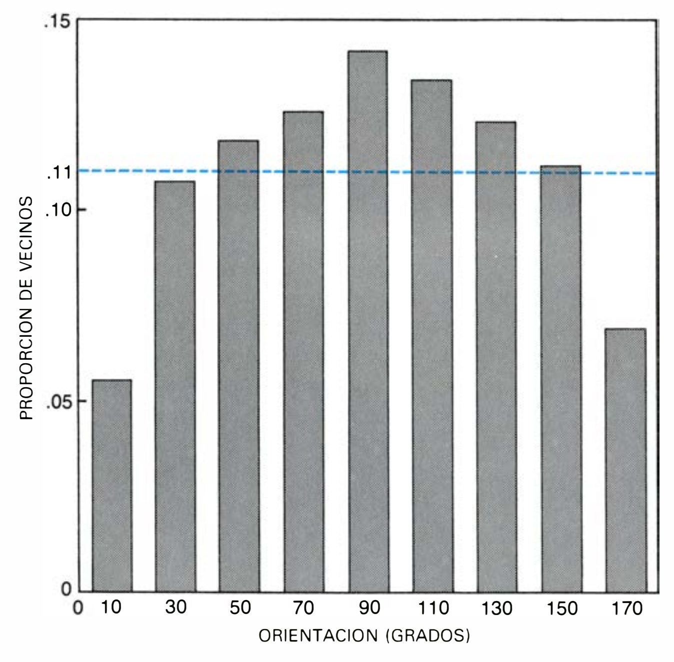
Sin embargo, la distancia de acercamiento mínimo no es la que suelen guardar los peces del cardumen. En cada especie hay una distancia preferida típica al vecino más próximo, que por lo general equivale a una longitud del cuerpo. Normalmente, sólo uno de los vecinos se halla a la distancia preferida. (En una red cúbica varios peces circundantes se hallarían a la vez a la misma distancia.)

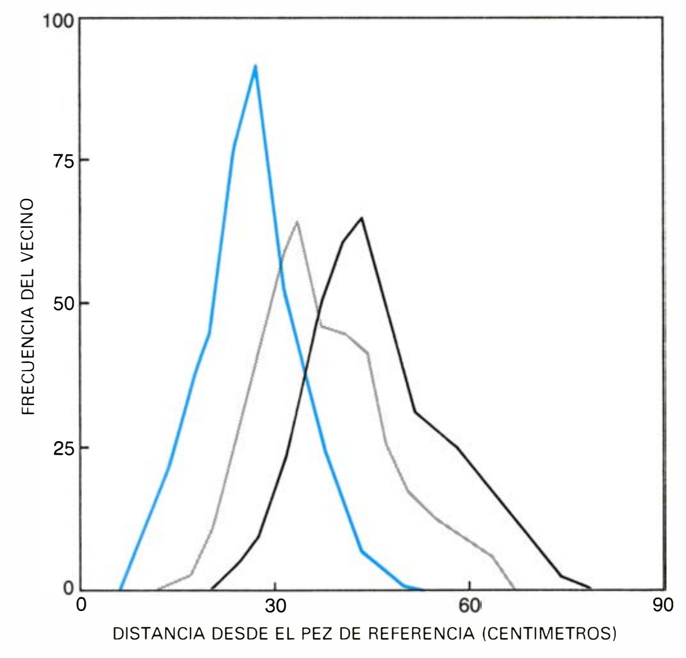
Las relaciones espaciales entre los peces de un cardumen cambian constantemente al tiempo que éstos ajustan su velocidad y su dirección. Por esa razón, la distancia al vecino más próximo no es uniforme, ni siquiera para un individuo. La distancia preferida es una abstracción estadística, que resulta de promediar las distancias reales a lo largo de un período prolongado.

Los peces tienden asimismo a mantener a su vecino más próximo a un ángulo particular con respecto a su eje corporal. Al igual que la distancia preferida, el ángulo preferido es un valor estadístico. En cualquier momento puede que sólo unos pocos peces tengan sus vecinos más próximos en el ángulo preferido; pero sobre un período largo, predomina el ángulo preferido.

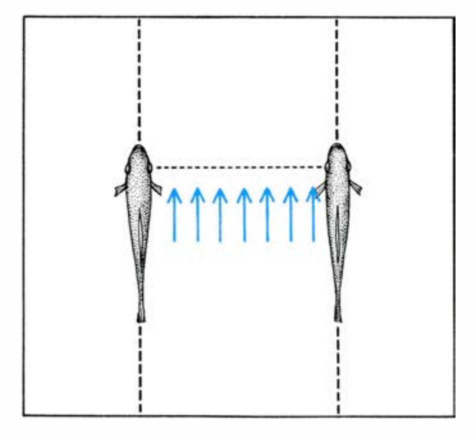
Una medida útil del grado de estructura de un cardumen es la relación media entre la distancia al segundo vecino más próximo y la distancia al vecino inmediato. Cuanto más cercana es esta relación a 1, más uniforme es la estructura. En un red cúbica, la relación vale exactamente 1. La relación varía considerablemente según las especies. Para el arenque se cifra en 1,1; para el abadejo negro, en 1,3; y, en 1,5, para el bacalao. Una relación de 1,5 es sólo ligeramente inferior a la relación de 1,6, que se observaría si los peces del cardumen tomaran posiciones aleatorias.

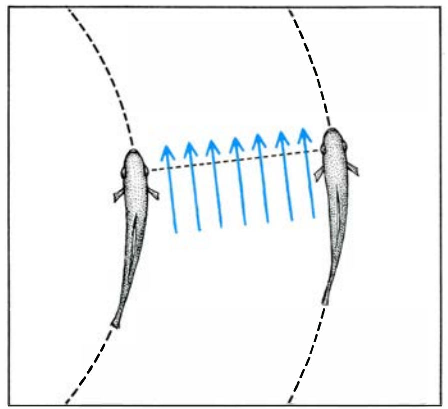
Algunas otras medidas sugieren que los cardúmenes del arenque se hallan organizados de manera más regular que los del abadejo negro o el bacalao. Sin embargo, incluso cuando se toman en consideración estas diferencias, parece que la mayoría de majales se hallan organizados sobre las mismas bases: me-

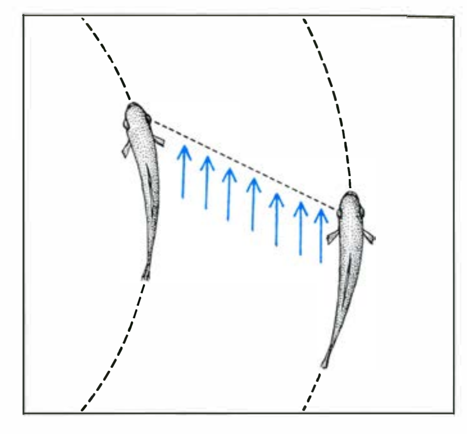




ESTRUCTURA DE UN CARDUMEN; es indeterminada y probabilística, a diferencia de la disposición de los átomos en el entramado de un cristal. La estructura es el resultado de la tendencia de cada pez a mantener a su vecino inmediato a una distancia y ángulo determinados. El gráfico de la izquierda indica dónde es más probable encontrar el vecino más próximo en la zona que rodea a un determinado abadejo negro. Cero grados es directamente delante del pez; 180, inmediatamente detrás. El vecino más próximo de un abadejo negro tiende a permanecer al lado de éste, como indica la barra, más larga, de 90 grados. La línea discontinua señala dónde se hallarían los vecinos si los peces tomaran posiciones al azar. El gráfico de la derecha muestra la frecuencia con que el vecino inmediato (*color*), el segundo vecino más próximo (*gris*) y el tercer vecino más próximo (*negro*) se encuentran a diferentes distancias. El vecino inmediato suele hallarse a una distancia de 25 a 30 centímetros, una longitud del cuerpo. La amplitud horizontal de las curvas indica que la distancia y el ángulo preferidos constituyen abstracciones estadísticas: en un momento dado, numerosos peces se encuentran a otras distancias y ángulos.







INFORMACION CONTRADICTORIA proporcionada a veces por los ojos y las líneas laterales. Cuando el banco nada en línea recta, los sentidos concuerdan. Los ojos informan al pez de la izquierda de que su vecino mantiene el paso; las líneas laterales le dicen que su vecino nada a la misma velocidad (*izquierda*). Cuando el cardumen gira en arco y los peces vecinos permanecen uno junto al otro en rumbos paralelos, los ojos del pez de la parte interna le informan de que su vecino mantiene el paso. Sin embargo, puesto que el pez de la parte externa efectúa un recorrido más largo, las líneas laterales le dicen al pez de la parte interna que su vecino avanza más deprisa (*centro*). Si aquél acelerara para igualar la velocidad de éste según la apreciación de las líneas laterales, el banco se desintegraría (*derecha*). Cuando la información procedente de los sentidos es contradictoria, la visión parece tener prioridad.

diante el mantenimiento de una distancia y un ángulo preferidos. Todos los esfuerzos por clasificar las especies en razón de su comportamiento facultativo u obligado, en el cardumen, o en razón de la mayor o menor polarización del banco en que se integran, parecen ahora desencaminados. Semejantes distinciones categóricas carecen de fundamento, según todos los indicios. Los majales de peces parecen variar a lo largo de un continuo en su grado de organización. Otros investigadores han demostrado que los cardúmenes de calamares, de renacuajos de ranas e incluso las bandadas de ciertas aves se organizan según los mismos principios.

En nuestros estudios nos interesamos particularmente por la función que ejerce la línea lateral en la determinación de la estructura del cardumen. La mayoría de especies de peces poseen una prominente línea lateral a cada lado del cuerpo. Los receptores sensibles al desplazamiento que constituyen la línea se denominan células apicales, o neuromastos, y se parecen mucho a los receptores del oído de un vertebrado terrestre. Las células apicales se disponen en canales que se extienden intrincadamente sobre la cabeza del pez y, en una disposición aproximadamente lineal, entre la cabeza y la cola.

Aunque se había sugerido ya que la línea lateral desempeñaba algún papel en la formación del cardumen, la mayoría de investigaciones consideraban que la visión era mucho más importante. En la década de 1920, Parr postuló que la formación de cardúmenes dependía exclusivamente de la visión. Decía en concreto que los peces se sentían atraídos por la presencia de otro miembro de su especie, y que éste repelía aquél cuando se le arrimaba demasiado. La cohesión del banco vendría a resultar, pues, del juego de fuerzas atractivas y repulsivas que se equilibrarían, arrancando unas y otras del mutuo avistamiento.

Para comprobar si la línea lateral llegaba a intervenir también, sometimos a observación cardúmenes de abadejos negros donde se integraban individuos cegados temporalmente o a los que se les había cortado la línea lateral por detrás del opérculo, el halda ósea que recubre las branquias. Se cegaba a los abadejos negros colocándoles sobre los ojos lentes de contacto opacas. Cuando se colocó a los peces cegados en un banco de peces intactos, respondieron a lo cambios de velocidad y de dirección del cardumen y mantuvieron su posición entre los demás peces. Sin embargo, se observaron ciertos cambios en el comportamiento: los peces cegados tendían a nadar algo más alejados de su vecino más próximo de lo que ordinariamente nadan los abadejos negros.

Los peces a los que se había extirpado la línea lateral también podían embancar. Mas a diferencia de lo que ocurría con los peces cegados, los que tenían la línea lateral cortada nadaban más cerca de su vecino inmediato de lo que ordinariamente nadan los abadejos negros. Tan sólo los ejemplares cegados y amputados en su línea lateral no conseguían mantener la posición. ¿Qué lección nos dan esos resultados? La siguiente: cuando los peces forman cardúmenes utilizan a la vez información ocular y la de su línea lateral. La distancia que mantienen con los ojos es menor que la distancia que mantienen con las solas líneas laterales; la distancia preferida en los peces incólumes se halla entre estos dos valores. La visión parece proporcionar la fuerza de atracción entre los miembros del banco (los abadejos negros nadan más separados sin ella); sin embargo, la fuerza repulsiva parece que proviene de la línea lateral (sin ella, los peces nadan más cerca unos de otros).

Otros resultados sugieren que la visión es el sentido más importante para mantener la distancia al vecino más próximo y el ángulo con éste. La línea lateral parece ser más importante en la determinación de la velocidad y dirección del vecino. Existen pruebas concluyentes de que se utilizan ambos sentidos a la vez. Se ha medido la correlación entre la velocidad y la dirección de un determinado pez y las de otros peces del cardumen un momento antes; estas correlaciones pueden indicar qué norma de referencia emplea cada pez para ajustar su velocidad. Ni la velocidad ni la orientación de un pez están fuertemente correlacionadas con las de su vecino inmediato. Es más, los resultados muestran que el cardumen carece de líder: su velocidad y dirección no están estrechamente correlacionadas con las de un determinado pez.

Las correlaciones más fuertes se observan entre la velocidad y la dirección del individuo y la velocidad y la dirección medias de todo el banco. La media que está más correlacionada no es la simple media aritmética de las velocidades y de las orientaciones de los miembros del cardumen: en un pez influyen mucho más sus vecinos inmediatos que los miembros distantes del cardumen. La contribución de cada pez a la media es inversamente proporcional al cuadrado o al cubo de la distancia.

Tanto una correlación basada en el cuadrado de la distancia como una ba-

sada en el cubo explican con pareja precisión nuestras observaciones. Si el cardumen se mantuviera por la visión, cabría esperar que la correlación dependiera del cuadrado de la distancia. Las discriminaciones hechas mediante la visión dependen en parte de la superficie de la figura percibida. La superficie disminuye con el cuadrado de la distancia.

Si el cardumen se mantuviera únicamente por la sensibilidad de la línea lateral al desplazamiento del agua, cabría esperar que la correlación dependiera del cubo de la distancia, pues el volumen de agua desplazado varía inversamente con el cubo de la distancia. Dado que la correlación basada en el cuadrado y la basada en el cubo muestran aproximadamente la misma intensidad, cabe suponer que se emplean ambos sentidos.

Aunque en la formación de majales parecen utilizarse tanto los ojos como las líneas laterales, hay ocasiones en las que la información procedente de esos órganos es contradictoria. Un conflicto de este tipo surge cuando el cardumen gira en arco (como lo hace continuamente en un tanque circular). Si dos peces realizan el giro uno junto al otro, ambos reciben información contrapuesta. Los ojos del pez que realiza el recorrido interior le dicen que su vecino exterior mantiene la posición. No obstante, y puesto que el pez del recorrido exterior debe cubrir una mayor distancia para mantener la posición, la información procedente de las líneas laterales indica al pez de la parte interna que su vecino nada más aprisa. Nuestros estudios muestran que cuando la información procedente de los dos sistemas sensoriales entra en conflicto, prevalece la que procede de los ojos.

Al investigar determinadas formas del comportamiento animal, los biólogos han tendido a buscar una única explicación sensorial. Sabemos ahora que la formación de cardúmenes se consigue comparando información procedente de más de un origen sensorial. Algunos otros fenómenos, como la navegación de las palomas que regresan al palomar, parecen requerir también sistemas sensoriales múltiples. Cabía esperarlo aunque no fuera más que por razones evolutivas: la selección tiende a favorecer al animal capaz de explotar la máxima información. Cuando se comprendan por entero las intrincadas maniobras de los bancos de peces, quizá descubramos también que participan en ellas otros sentidos.

Mecanismos cerebrales de la atención visual

El proceso mediante el cual el cerebro decide qué objetos del campo visual merecen atención puede estudiarse registrando la actividad de células cerebrales de monos que responden a estímulos visuales

Robert H. Wurtz, Michael E. Goldberg y David Lee Robinson

La vida diaria nos depara un continuo bombardeo de estímulos visuales, sonoros, olfativos, táctiles y gustativos, de los cuales seleccionamos parte de la información que nos ha de orientar en nuestra conducta e ignoramos el resto. Así, pasa inadvertido el contacto de la ropa con la piel, pero reaccionamos de inmediato ante las sensaciones despertadas por un insecto que se pasea por ella. Ignoramos el ruido de fondo de una fiesta, concentrándonos en nuestra conversación particular. La capacidad de seleccionar objetos interesantes del medio que les rodea se denomina atención. William James la describió así: "Todo el mundo sabe lo que es la atención. Consiste en tomar posesión con la mente, de forma clara y viva, de un objeto entre todos aquellos vistos simultáneamente, o de una idea en una sucesión de pensamientos. La focalización, la concentración de la conciencia, constituye su esencia. La atención supone abstraerse de ciertas cosas para ocuparse con eficacia de otras".

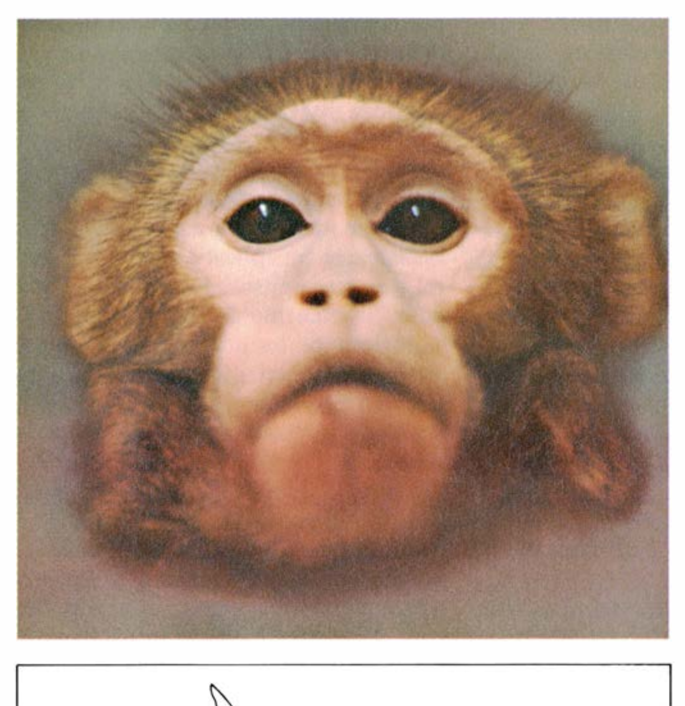
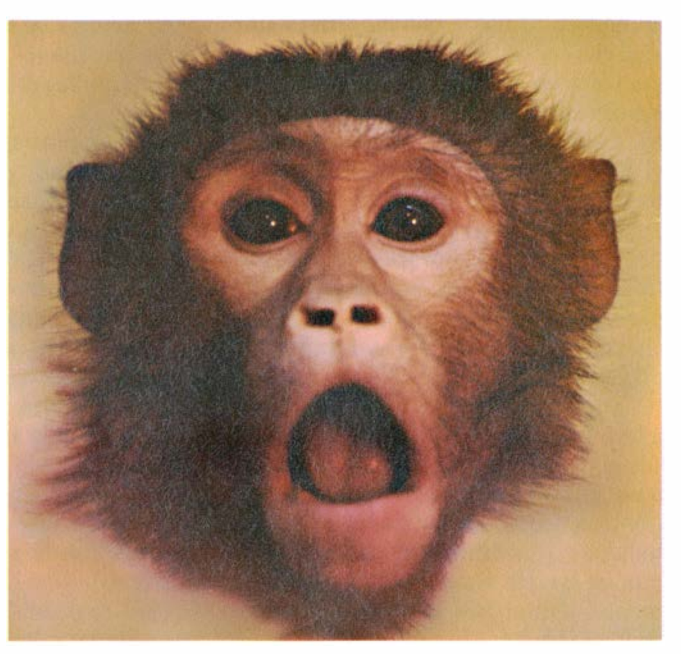
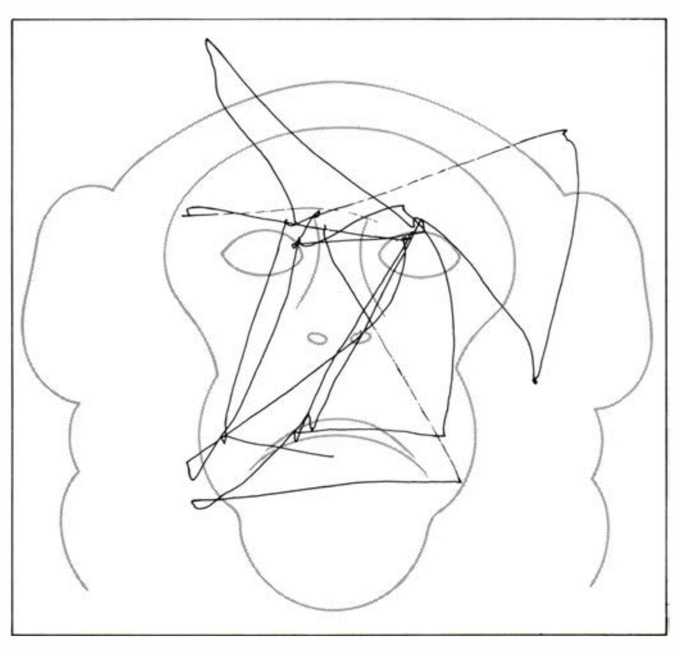
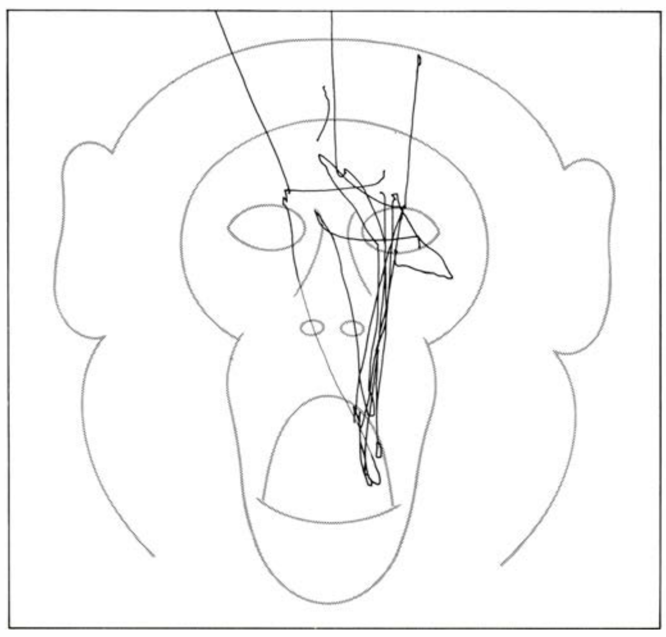
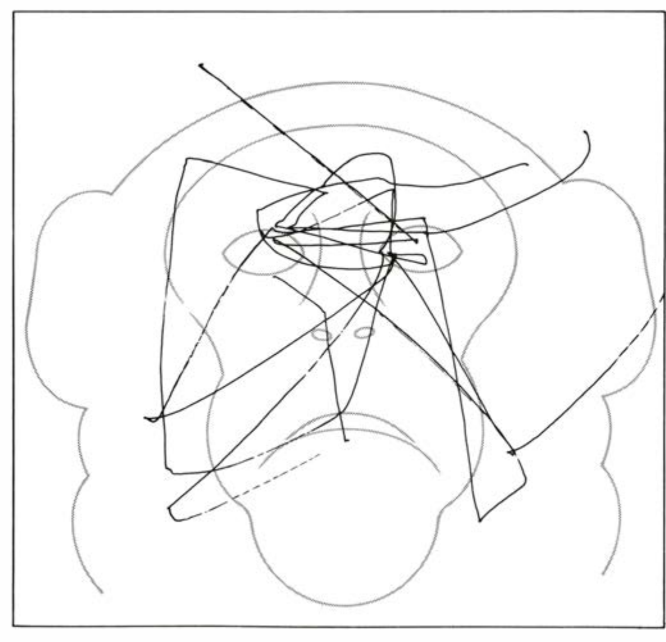
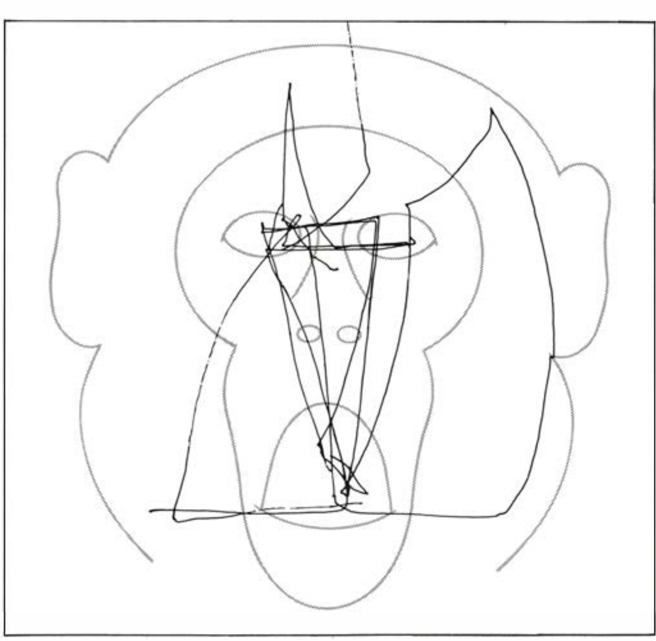
El proceso de la atención visual, es decir, la capacidad de seleccionar ciertos objetos del campo visual, ha merecido especial interés por parte de psicólogos y fisiológos, pues va unido a una expresión fidedigna y cuantificable: el movimiento de los ojos. La razón de tal concomitancia es muy simple. La retina no responde de manera uniforme a la luz; su sensibilidad varía. Una parte muy pequeña de la retina, la fóvea, que responde a la luz desde el centro del campo visual, posee una elevada concentración de células fotorreceptoras. En consecuencia, puede analizar el patrón de luz en una escala de mayor precisión que la porción periférica de la retina. Los globos oculares giran en sus órbitas bajo la influencia del cerebro, a fin de proyectar en la fóvea, dotada de gran poder analítico, los objetos de mayor interés. Al leer estas líneas, por ejemplo, su mirada salta de un grupo de palabras al siguiente, para que la imagen se proyecte en la fóvea. Cada uno de esos desplazamientos se denomina movimiento sacádico, del francés *saccader*, que significa "tirar bruscamente"; en lo sucesivo, a tales movimientos los llamaremos también movimientos en sacudidas. Habitualmente duran menos de 50 milisegundos. Casi toda la información que conduce a la percepción visual llega al cerebro en los períodos comprendidos entre dos movimientos sacádicos, cuando la mirada está fija en el objeto seleccionado.

Puesto que el proceso de atención visual está íntimamente ligado a los movimientos en sacudidas, quizá valdría la pena cambiar la pregunta "dónde está la atención de fulano" por esta otra: "¿qué hacen los ojos de fulano?". El psicólogo ruso Alfred L. Yarbus registró los patrones de los movimientos oculares de personas que observaban fotografías, poniendo de manifiesto que centraban su atención en los rasgos más sobresalientes de la imagen. Por otra parte, también puede uno fijarse en los objetos que vemos "por el rabillo del ojo". Michael T. Posner y colaboradores, de la Universidad de Oregón, han realizado experimentos en los que se mide el tiempo que tarda una persona en responder a una señal luminosa presionando una palanca, como un índice del grado de atención a la luz. Cuando la persona conoce de antemano dónde aparecerá la luz, responde más rápidamente, aunque se le indique expresamente que no realice movimiento sacádico alguno hacia el punto luminoso.

A partir de estas observaciones sobre la atención visual pueden diseñarse experimentos para investigar los mecanismos responsables de la misma en el sistema nervioso central. La atención visual implica, en primer lugar, la selección de un determinado objeto del campo visual a expensas de otros existentes en dicho campo. Segundo, la selección supone conservar la localización del objeto; es obvio que hay que conocer la ubicación del objeto que centra nuestra atención. Carece de relevancia el tipo de respuesta frente al objeto seleccionado: puede uno mirarlo con fijeza, tratar de alcanzarlo o simplemente darse por enterado de su existencia; en cualquier caso se le habrá prestado atención.

En experimentos iniciados en el Instituto Nacional de la Salud Mental, y que prosiguieron en el Instituto Nacional de Investigación Ocular, ambos norteamericanos, investigamos la actividad del sistema nervioso en relación con la atención visual; nos guiaron los criterios indicados en el párrafo anterior. Determinamos la actividad eléctrica de neuronas cerebrales de macacos rhesus en respuesta a estímulos visuales. Los registros se efectuaron con los

MOVIMIENTOS OCULARES realizados por monos rhesus al contemplar fotografías de las caras de otros monos. Tales movimientos revelan patrones de atención visual. En este ejemplo se presentaron a los monos Joe y B. F., durante ocho segundos, las dos caras de la fila superior. Una cara es más bien inexpresiva; la otra muestra una expresión conocida como boca abierta amenazante. La cara con la boca abierta fue objeto de mayor atención. Las fijaciones visuales de Joe (*fila central*) y de B. F. (*fila inferior*) están conectadas en general por movimientos rápidos de los ojos, o movimientos sacádicos. Los puntos de fijación dibujan los aspectos más sobresalientes de las caras. La ilustración se basa en el trabajo de Caroline F. Keating, de la Universidad Colgate, y de Gregory Keating, del Centro Médico Upstate.

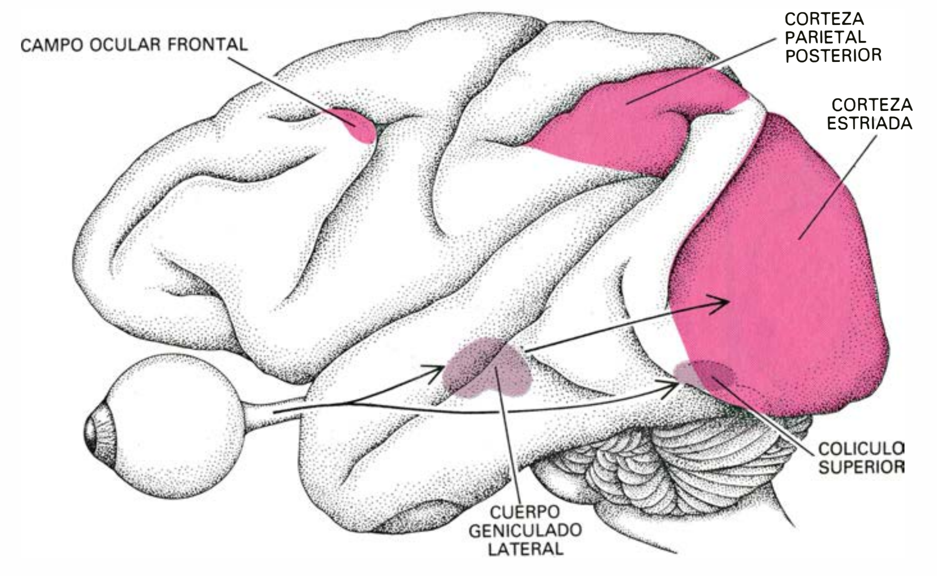
monos en vigilia y sin impedimentos para mover los ojos y atender a estímulos visuales. En nuestras investigaciones dábamos por bueno que el mono constituía un modelo adecuado para investigar la atención visual en el hombre. Basamos tal supuesto en que la agudeza visual del mono, su percepción del color y de la profundidad y su patrón de movimientos sacádicos son muy parecidos a los del hombre. Además, las regiones del cerebro del mono implicadas en la visión y en los movimientos oculares son semejantes, en cuanto a localización y estructura anatómica, a sus equivalentes en el hombre. Esperamos, por tanto, que los resultados anatómicos, fisiológicos y de conducta obtenidos en experimentos realizados con monos ayuden a comprender el fundamento neurológico del comportamiento humano.

El registro e interpretación de la actividad eléctrica de las células nerviosas del cerebro se apoyan en que esa actividad presenta un patrón característico. En reposo, todas las células nerviosas muestran una diferencia de potencial entre el interior de la célula y el medio que las rodea; es el denominado potencial de reposo. Hay momentos en que dicho potencial cambia espectacularmente y, en pocos milisegundos, vuelve de nuevo a su valor original. La desviación del potencial de reposo, denominada potencial de acción, recorre toda la longitud del axón, es decir, la prolongación más larga que parte del cuerpo celular. A través del axón, el potencial de acción pasa de una célula nerviosa a otra; así es como se intercambian mensajes las células del sistema nervioso. Los cambios de potencial pueden medirse mediante microelectrodos dispuestos en las proximidades de las neuronas.

Supongamos que una determinada célula nerviosa produce una serie de potenciales de acción cuando un punto de luz incide en cierta parte de la retina. Aunque la célula efectúe descargas esporádicas en otras ocasiones, puede concluirse que dicha neurona está relacionada con la percepción de los estímulos visuales o con las respuestas a estímulos visuales. Imaginemos también que otra célula nerviosa se dispara de forma intensa y predecible antes de ciertos movimientos corporales; podrá sospecharse que dicha célula está relacionada con la génesis de tales movimientos.

Para realizar los experimentos que permitieran relacionar la actividad nerviosa y la atención visual en monos, hubo que entrenar antes a los animales. Se comenzó por enseñarles cómo apretar una palanca que hiciera aparecer un punto luminoso en una pantalla que tenían delante. Pocos segundos después de su aparición, el punto luminoso se atenuaba y permanecía débil durante medio segundo. Si el mono dejaba de presionar la palanca cuando el punto luminoso se atenuaba, recibía en recompensa un sorbo de zumo. El punto era tan pequeño y la atenuación tan sutil, que el mono debía proyectar su fóvea sobre él. (Las personas con las que ensayamos la misma experiencia se comportaban de igual modo.) La verdad es que el mono prestaba tanta atención al punto luminoso, o punto de fijación en nuestra jerga particular, que raramente desplazaba sus ojos en sacudidas para observar los puntos de luz que pudiéramos proyectar en otras zonas de la pantalla. Pero si movíamos el punto de fijación, los monos producían un movimiento sacádido desde la primera posición hasta la nueva.

Entrenados ya en estas habilidades iniciales, se les aplicaba anestesia general y se les preparaba quirúrgicamente para la obtención de registros neurofisiológicos. Se les implantaba un dispositivo que limitaba los movimientos de la cabeza, detectores de los movimientos oculares y una cámara a través de la cual podían introducirse microelectrodos para registrar la actividad eléctrica de neuronas individuales. Cada día, al comienzo del trabajo experimental, se sacaba al mono de sú jaula y se le hacía trepar por el aparato de experimentación. En general, el mono colaboraba gustosamente; con un solo animal podían estudiarse varios centenares de células en unos meses. Afortunadamente, el cerebro es insensible al dolor. En pacientes humanos se realizan estimulaciones eléctricas o registros mientras la persona está consciente para luego practicar cirugía cerebral de forma más precisa; por ejemplo, en aquellos casos en los que se trata de aliviar una epilepsia intratable por otros métodos.



VARIAS AREAS CEREBRALES del mono rhesus contienen células que responden a estímulos luminosos (por ejemplo, puntos de luz en una pantalla a la que mira el mono) cambiando su actividad eléctrica. El colículo superior recibe señales directamente de la retina. Lo mismo ocurre con el cuerpo geniculado lateral, que a su vez establece comunicación con la corteza estriada. Otras dos áreas corticales responden también a los estímulos visuales. Se trata del campo ocular frontal y de la corteza parietal posterior.

Puesto que nuestro objetivo era investigar la fisiología de la atención visual, empezamos por estudiar las propiedades de las células nerviosas en áreas del cerebro que reciben señales de la retina a través del nervio óptico. En el mono y el hombre, el nervio óptico se divide en dos vías principales. Una de ellas lleva al cuerpo geniculado lateral, un conjunto de neuronas cuyos axones se proyectan a su vez en la corteza estriada, la parte posterior de la corteza cerebral. En esta región comienza el análisis del mundo visual en cuanto a color, forma, movimiento y profundidad.

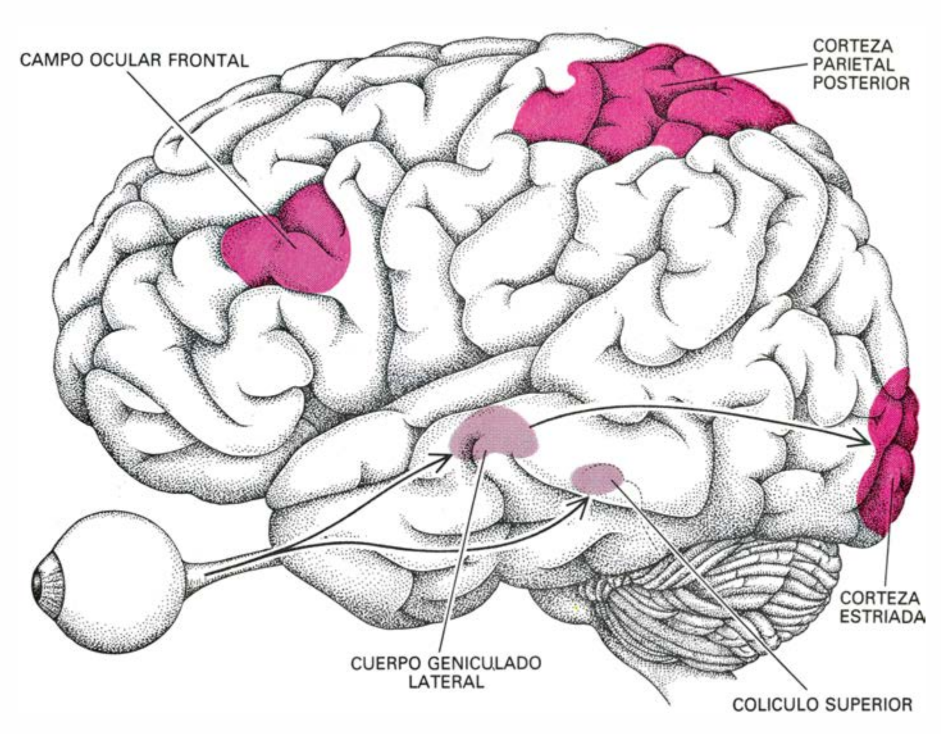
La segunda vía termina en el colículo superior, un área propia de los mamíferos situada en la parte superior del tronco cerebral. El colículo superior es el equivalente al téctum óptico de los vertebrados inferiores, zona situada en la parte superior del tronco cerebral, que recibe axones del nervio óptico. En los anfibios y en los peces, el téctum óptico constituye el área visual más importante.

Empezamos, pues, detectando la actividad eléctrica de las células del colículo superior. Sabíamos de antemano que tales células, como la mayoría de las neuronas del cerebro que responden a estímulos visuales, se excitan única-

mente por la luz que incide en un área específica de la retina y no por la luz difusa. Podía delimitarse dicha área, que se denomina campo receptivo de la célula nerviosa correspondiente, midiendo la respuesta celular a puntos luminosos proyectados en varias posiciones en la pantalla, mientras el mono miraba el punto de fijación. Mantenía éste su mirada fija; cabía deducir que la posición del punto de luz en la pantalla, con respecto al punto de fijación, correspondía a la posición de la imagen del punto luminoso en la retina en relación a la fóvea. Los puntos luminosos con determinadas localizaciones provocaban una serie de potenciales de acción de la célula, cosa que no lograban los estímulos luminosos con localizaciones distintas.

En el caso del colículo superior, observamos que pequeños puntos luminosos situados en una amplia zona del campo visual, de modo que su imagen incidiera en cualquier sitio de una gran parte de la retina, podían activar una célula nerviosa. Un campo receptivo próximo a la fóvea viene a significar un ángulo de cuatro grados en el campo visual. Más lejos de la fóvea, los campos pueden tener un diámetro de 20 grados. (La anchura del dedo índice a una distancia correspondiente al brazo extendido tapa un ángulo de alrededor de 1 grado.)

Mientras realizábamos los ensayos encaminados a delimitar los campos receptores de las células del colículo superior se presentó una situación curiosa: cuando el mono, por error, dirigía su mirada hacia un punto luminoso inscrito en el campo receptor de la célula cuya actividad estábamos registrando, la respuesta de la célula era mucho más intensa que aquella que se obtenía cuando el mono continuaba atento al punto de fijación. En vista de este resultado, modificamos el experimento, recompensando al animal con un sorbo de zumo cuando realizaba esos movimientos oculares en sacudidas. Confirmamos así lo que ya conocíamos: muchas células del colículo superior descargan más intensamente y de forma más regular cuando el punto luminoso del campo receptor es el objetivo de un movimiento ocular. Aproximadamente la mitad de las células del colículo superior que no respondían a estímulos visuales mostraban ese tipo de respuesta. La respuesta típica aparecía 50 milisegundos después de proyectar el punto luminoso en la pantalla. El movimiento ocular hacia el punto luminoso ocurría alrededor de 200 milisegundos después de la aparición del punto luminoso.



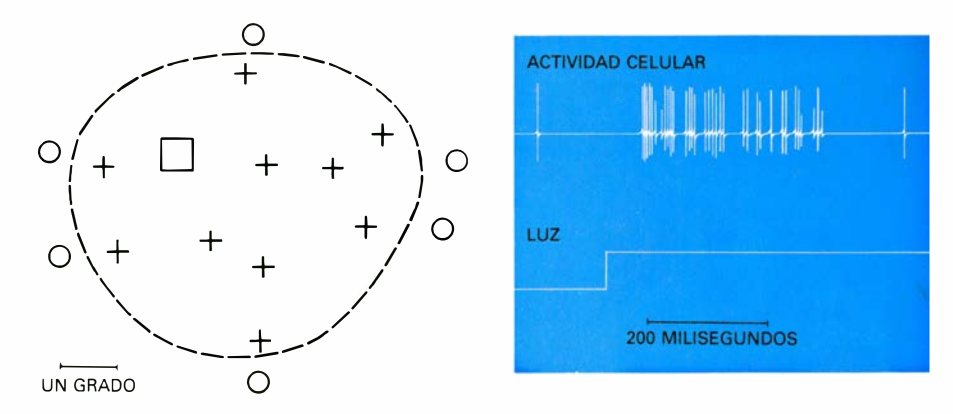
AREAS CORRESPONDIENTES del cerebro humano. El colículo superior, el cuerpo geniculado lateral y la corteza estriada, entre otras, son notablemente similares a las del mono. La gran extensión de la corteza cerebral humana hace difícil delimitar el campo ocular frontal y la corteza parietal posterior.

No había duda de que el mono prestaba atención al punto luminoso: sus ojos se movían en respuesta al mismo. Era obvio, asimismo, que las intensas descargas que experimentaban las células del colículo superior indicaban que se modificaba la actividad de otras células cerebrales, por ejemplo, las neuronas en las que las células del colículo superior proyectaban sus axones. ¿Correspondía esta actividad eléctrica a un proceso en virtud del cual "la mente tomaba posesión de un objeto"?

Para responder a esta pregunta debíamos resolver antes varios problemas. Había que empezar por determinar si ese aumento de la respuesta requería un estímulo visual o simplemente correspondía a la actividad que precedía a un movimiento ocular espontáneo. Se comprobó que requería un estímulo. Cuando los ojos de los monos se desplazaban en sacudidas en total oscuridad, las células no respondían con descargas eléctricas. La respuesta potenciada no era sólo la antesala de un movimiento ocular, sino que formaba parte de la respuesta a estímulos visuales.

Se imponía resolver luego si la respuesta se asociaba también a movimientos sacádicos cuyos estímulos fuesen puntos luminosos diferentes; cabía la posibilidad de que el esfuerzo que comportaba todo movimiento ocular aumentase la excitabilidad de las células cerebrales que respondían a estímulos visuales. Examinamos tal posibilidad presentándole al mono dos puntos luminosos a la vez. Uno situado en el campo receptor de la célula cuyas descargas estábamos registrando y otro bastante apartado del mismo. Cuando dirigía su mirada hacia el punto luminoso del campo receptor, la célula mostraba un incremento de su actividad eléctrica antes de que se iniciara el movimiento sacádico. Pero si la dirigía hacia el punto luminoso situado fuera del campo receptor, no aparecía tal respuesta. Ello indicaba que la respuesta presentaba selectividad espacial: guardaba relación con estímulos localizados en una parte específica del campo visual.

Quedaba una última comprobación: verificar si la respuesta aparecía únicamente cuando el mono reaccionaba al estímulo de una forma determinada, es decir, en el caso exclusivo de que el estímulo constituyese el objetivo de un movimiento sacádico. Con este fin, y en colaboración con Charles W. Mohler, diseñamos un experimento en nuestro laboratorio en el que los monos reaccionaban, de modo distinto, a los puntos luminosos. Empezaba el animal por apretar la palanca que determinaba la aparición de un punto luminoso periférico. Pero aquí el punto era de gran tamaño y el mono recibía una recompensa si dejaba de presionar la palanca cuando se atenuaban el punto luminoso o el punto de fijación. El punto de fijación era lo suficientemente pequeño y su atenuación lo bastante débil para que el mono la apreciara sólo con su



POR CAMPO RECEPTOR de una célula nerviosa se entiende la porción del campo visual a la que dicha célula es sensible. A la izquierda aparece un mapa de un campo receptor. Los signos positivos indican puntos en los que la luz provoca un incremento de las descargas celulares (que se registran implantando microelectrodos en el cerebro). Los círculos, puntos en los que no se produce tal incremento. A la derecha se muestra la respuesta celular a un punto luminoso situado en la zona marcada con un cuadrado.

fóvea. Por el contrario, el mono podía captar la atenuación del punto luminoso periférico aun atendiendo sólo con la periferia de su retina. El mono, pues, tendía a dirigir su mirada hacia el punto de fijación; cuando reaccionaba a la atenuación de un punto periférico podía deducirse que había prestado atención a tal punto aunque sus ojos no experimentaran ningún movimiento.

El experimento fue concluyente. Las células del colículo superior que respondían con un incremento de sus descargas eléctricas cuando el mono dirigía su mirada hacia el punto luminoso enmudecían si el animal levantaba la presión de la palanca. De ello se deducía que el incremento de la actividad eléctrica de las células del colículo superior no era siempre un fenómeno concomitante con la atención visual. Tal actividad eléctrica estaría en relación con la iniciación de los movimientos oculares.

En la otra vía visual, la que conduce a la corteza cerebral, experimentos similares dieron lugar a resultados muy distintos. Una célula de la corteza estriada no mostraba más que un pequeño incremento de sus descargas eléctricas cuando un punto luminoso de su campo receptor constituía el objeto de un movimiento sacádico. Ofrecía el mismo incremento cuando el movimiento en sacudida se dirigía hacia otra parte del campo visual. Asimismo, aparecía tal incremento si el animal dirigía su atención al punto luminoso, dejando de presionar la palanca y sin realizar movimientos oculares. Puesto que el aumento de respuesta en la corteza estriada era el mismo para cualquier movimiento en sacudida, no se probaba que el movimiento ocular se dirigiera hacia el estímulo del campo receptor de una determinada célula. Es decir, la respuesta potenciada carecía de especificidad espacial y no podía relacionarse con la atención visual. Quizá se relacionara con el estado de alerta del mono. Tal estado afecta por igual al procesamiento de cualquier estímulo.

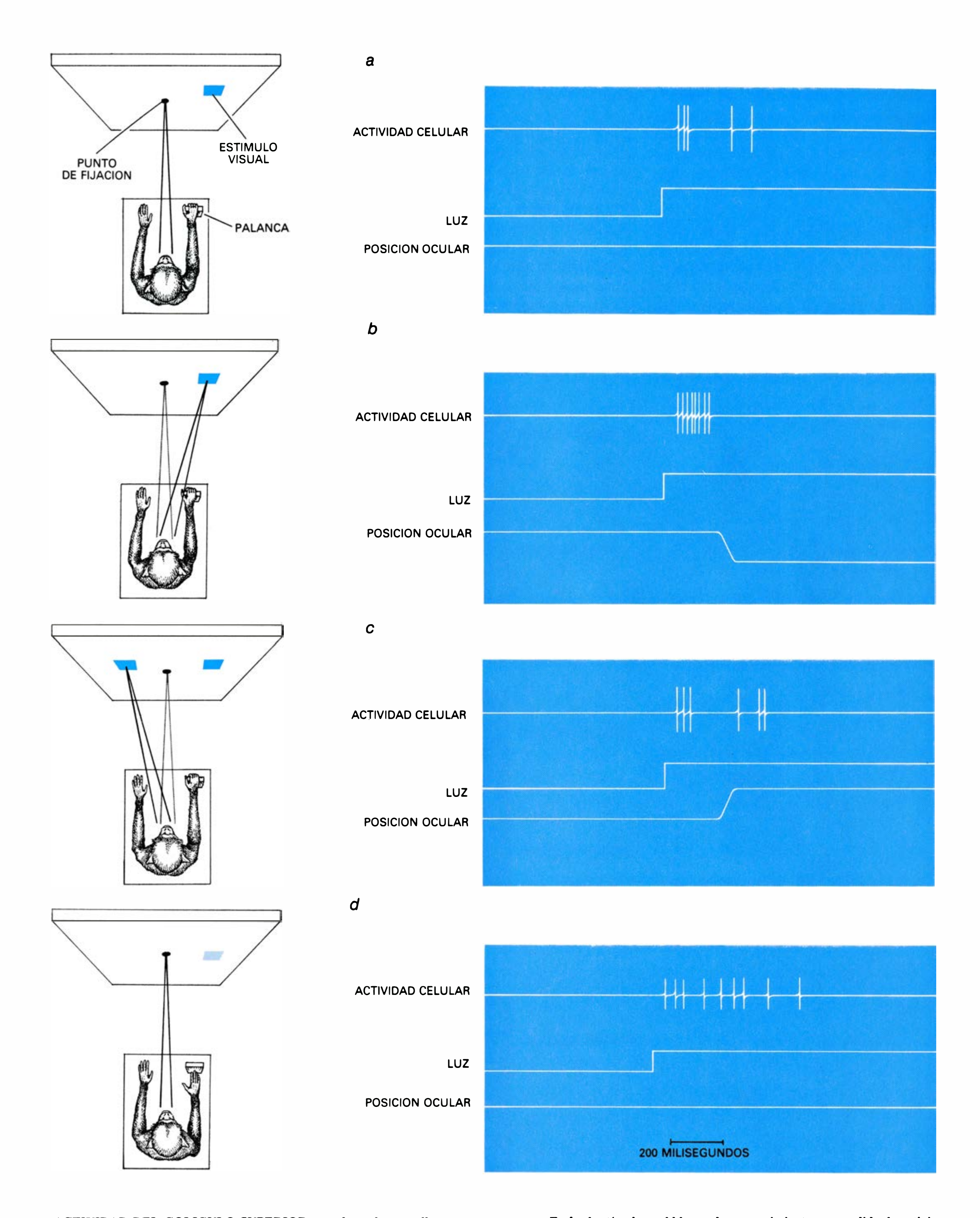
Los resultados de las dos series de experimentos ponen de manifiesto las diferencias observadas con anterioridad entre las dos vías visuales. En la corteza estriada, la actividad neural resulta notablemente modulada por los detalles del patrón de luz que incide sobre la retina. Las células responden de forma preferente a rendijas de luz situadas en un área determinada del campo visual y con una orientación precisa. Por otra parte, la activación de ciertas células requiere que la rendija se desplace en determinada dirección o que posea un color particular. Nuestros ensayos ponen de manifiesto que las distintas respuestas no experimentan modificación cuando el patrón visual es el blanco de un movimiento en sacudida o cuando le sirve de señal al mono para liberar la palanca. Es decir, la corteza estriada, la zona de la corteza cerebral que se muestra extraordinariamente sensible a los pormenores del campo visual, no resulta grandemente afectada por la significación que tales detalles puedan tener para el animal.

No ocurre igual en el colículo superior. En él, las células que responden a un estímulo visual llevan a cabo una integración rudimentaria: su activación requiere sólo un pequeño punto luminoso en cualquier lugar de una extensa superficie del campo visual. En el colículo superior la respuesta celular se modula claramente cuando el punto luminoso es el objetivo de un movimiento en sacudida. El procesamiento visual quizá sea pobre, pero estas células perciben la significación del estímulo.

Nuestros siguientes experimentos desvelaron un área de la corteza cerebral cuyas células respondían a los estímulos visuales de forma parecida a las células del colículo superior. El área se encuentra en el lóbulo frontal, ante la corteza motora, una región importante para el control de los movimientos corporales. En el siglo XIX, el fisiólogo escocés Sir David Ferrier mostró que, en los monos, la estimulación eléctrica de esta área cortical provocaba movimientos oculares. Denominó al área en cuestión campo ocular frontal. Durante algún tiempo los investigadores supusieron que el campo ocular frontal controlaba los movimientos oculares de igual forma que la corteza motora controlaba los movimientos del resto del cuerpo. Emilio Bizzi, que trabajaba en el Instituto Nacional de la Salud Mental, registró la actividad eléctrica de las células nerviosas del área ocular frontal. Observó que ninguna de ellas efectuaba descargas con anticipación a los movimientos oculares. Algunas, pocas, se disparaban durante y después de los movimientos oculares, pero esas células no podían, evidentemente, ser responsables de la iniciación de tales movimientos.

Cuando investigamos el campo ocular frontal, vimos que muchas de sus células descargaban en respuesta a los pequeños puntos luminosos que aparecían en cualquier parte de un campo receptor que podía alcanzar una extensión equivalente a un cuarto de todo el campo visual. (Un campo receptor de esa superficie es mayor que el propio de una célula típica del colículo superior y varias veces mayor que el campo de una célula de la corteza estriada.) Las células nerviosas del campo ocular frontal del mono no mostraban respuestas anticipadas a movimientos en sacudidas efectuadas en la oscuridad. En cambio, aparecían respuestas reforzadas cuando un punto luminoso de un determinado campo receptor constituía el blanco de un movimiento sacádico. No mostraban, sin embargo, respuestas aumentadas con anticipación a un movimiento en sacudida que dirigía la mirada hacia otro punto o antes de que el mono prestara atención al punto sin realizar un movimiento en sacudida.

De todo ello se deduce que estas células nerviosas, al igual que las del colículo superior, no explican por sí solas la atención visual. La razón es la misma: puede disociarse la atención de los movimientos oculares, pero no el incremento de las descargas de estas células.

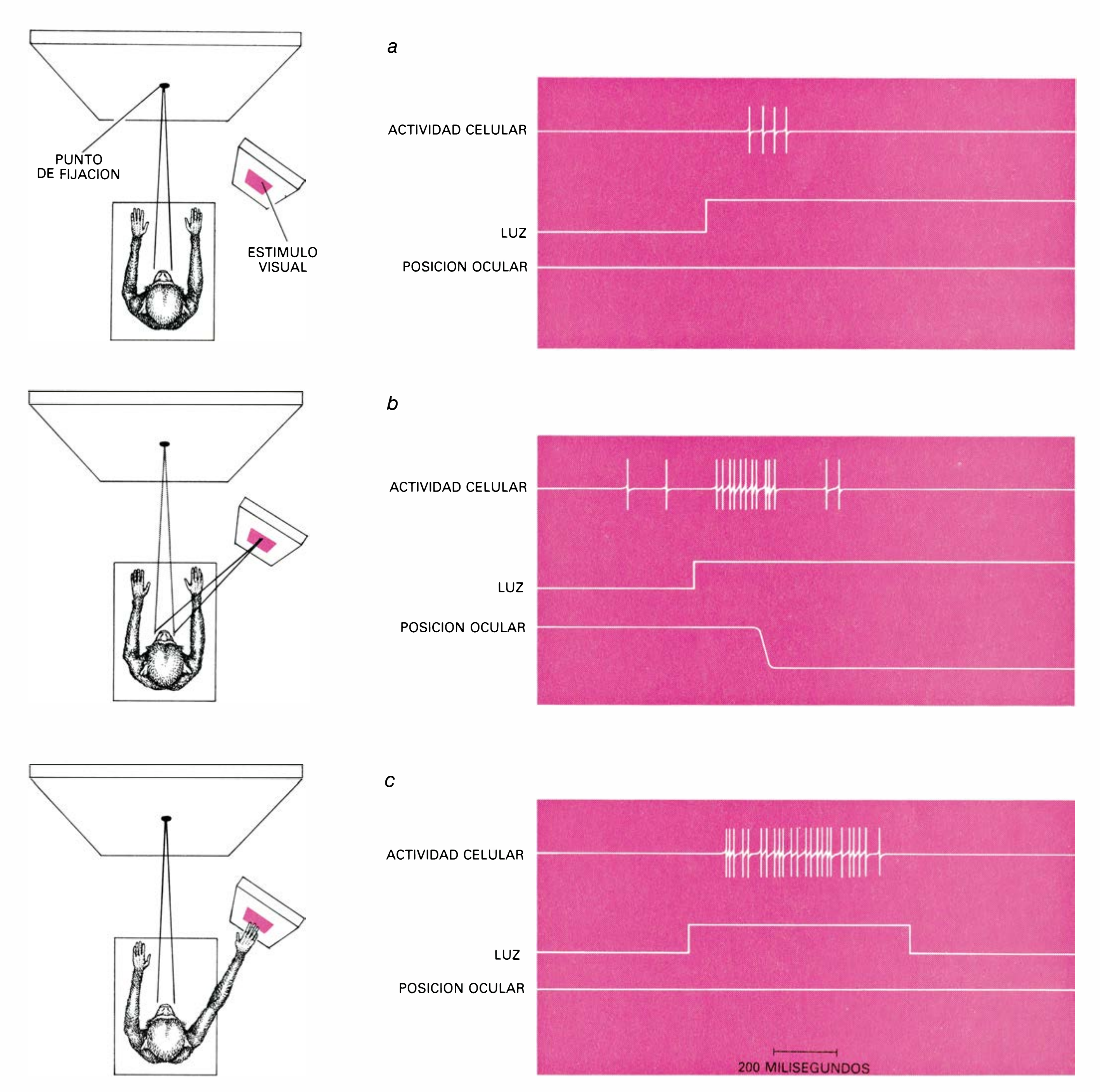


ACTIVIDAD DEL COLICULO SUPERIOR cuando en la pantalla aparece un punto luminoso. La actividad registrada depende de cómo el mono reaccione al estímulo. En estos experimentos se registra la actividad de una célula del colículo superior cuando un punto luminoso estimula su campo receptor. En *a*, el mono mantiene la mirada fija en un punto central de luz (punto de fijación) e ignora el estímulo; la célula responde al estímulo con algunas descargas. En *b*, el estímulo es el blanco de un movimiento en sacudida; la actividad celular aumenta. En dos experimentos adicionales no se logró un incremento similar de la actividad. En *c*, un punto luminoso fuera del campo receptor de la célula es el blanco de un movimiento sacádico. En *d*, no hay tal movimiento, pero el mono atiende al estímulo en el campo receptor levantando, cuando el estímulo se atenúa, la presión que ejerce sobre una palanca.

Quizá las células nerviosas que hemos estudiado en el campo ocular frontal expliquen la observación de Ferrier. Cuando aplicamos una pequeña corriente eléctrica a una célula del campo ocular frontal que responde a estímulos visuales, un movimiento sacádico desplaza los ojos hacia el centro del campo receptor de la célula. Suponemos que la célula suministra normalmente información visual a los mecanismos neurales que determinan el movimiento de los ojos. La estimulación eléctrica atraviesa ese canal de comunicación y los ojos del mono experimentan un movimiento en sacudida como si existiera un blanco visual.

Si el colículo superior, la corteza estriada y el campo ocular frontal no median la atención visual, ¿qué neuronas serán las responsables de la misma? Los datos clínicos implican la intervención de una parte de la corteza cerebral denominada corteza parietal posterior. Las personas que sufren lesiones de la corteza parietal posterior del lado derecho tienden a ignorar objetos existentes en la mitad izquierda de su campo visual. Esos individuos ven los objetos, pero no les prestan atención. Un notable ejemplo de esta anomalía lo constituyen los autorretratos que el artista alemán Anton Räderscheidt pintó después de sufrir una apoplejía que dañó la corteza parietal del lado derecho de su cerebro [*véase la ilustración de la página 92*]. Un autorretrato realizado al comienzo de su recuperación omite el lado izquierdo de su cara.

Los experimentos realizados con monos por Juhani Hyvärinen y colabora-

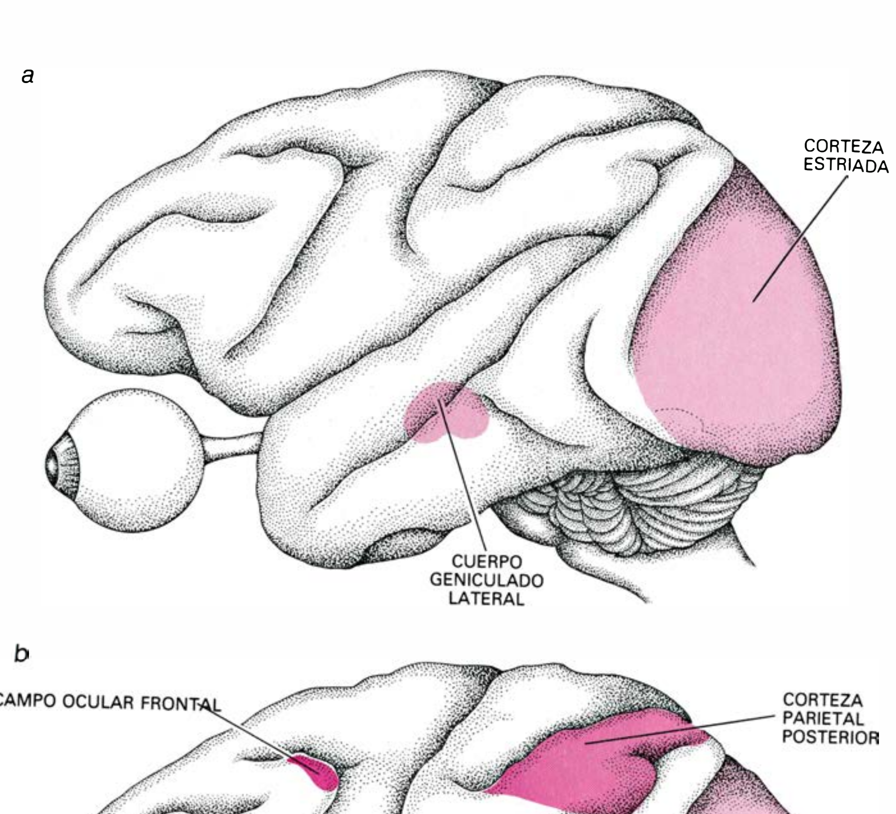


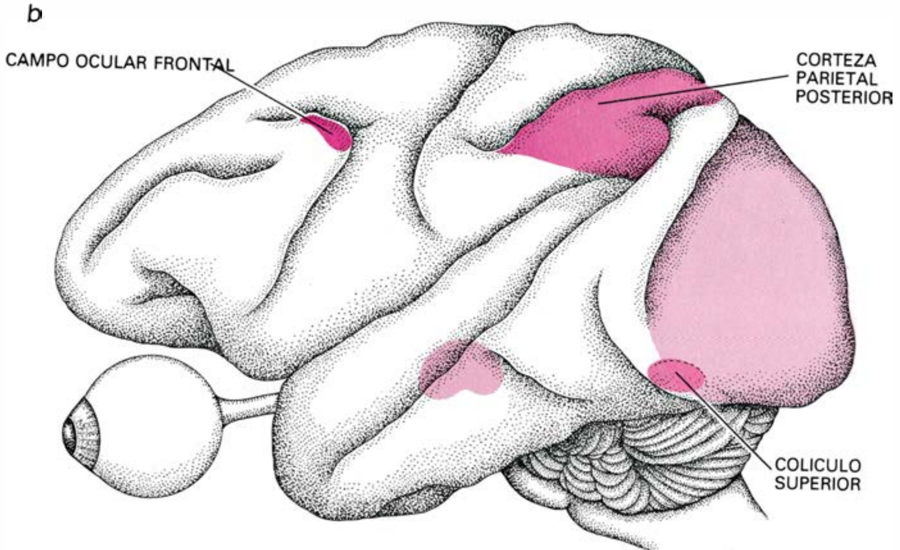
LA ACTIVIDAD de la corteza parietal posterior difiere de las del colículo superior y la corteza estriada y el campo ocular frontal, en el sentido de que aparece una mayor actividad cuando el mono presta atención al estímulo luminoso, con independencia de la forma con que lo haga. En *a*, el mono no muestra reacción; una célula parietal posterior responde al estímulo con escasos potenciales de acción. En *b*, el estímulo es el blanco de un movimiento sacádico; la actividad de la célula aumenta. En *c*, el mono toca el punto luminoso y de nuevo se aprecia un incremento de la actividad eléctrica celular.

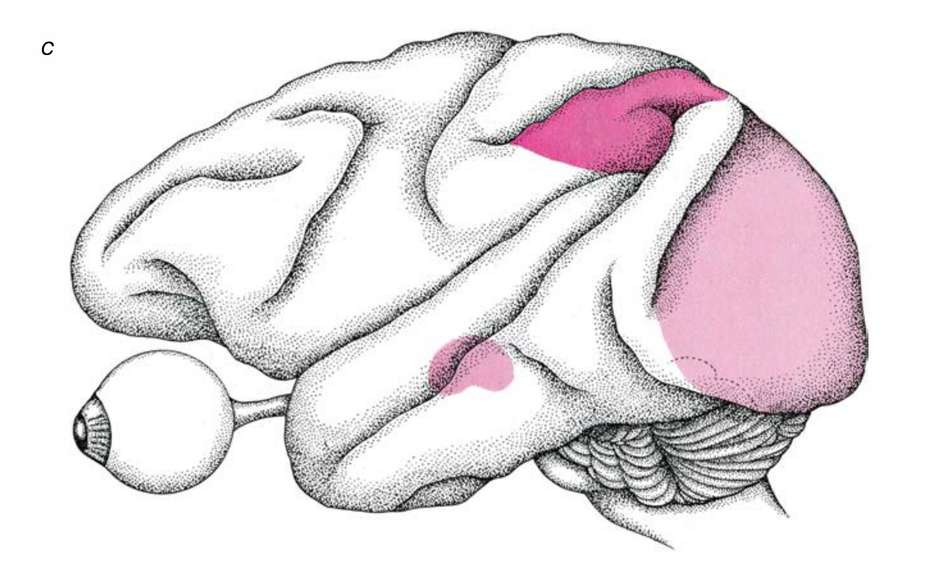
dores, de la Universidad de Helsinki, han detectado actividad en las células de la corteza parietal posterior cuando la conducta del mono está dirigida por la visión. Así, en la situación en que el animal trata de alcanzar un objeto o sigue el movimiento de un objeto con sus ojos. Los experimentos llevados a cabo por Vernon B. Mountcastle y colaboradores, en la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, han demostrado que las células de la corteza parietal posterior experimentan descargas anticipadas a los movimientos oculares. Mountcastle ha propuesto que la actividad de estas células estaría relacionada con la atención visual. Tomando como base estos ensayos y los datos clínicos, decidimos realizar experimentos en la corteza parietal posterior, en colaboración con Gregory Stanton y Catherine Bushnell, de nuestro laboratorio. Descubrimos que las células nerviosas de esa área poseían campos receptores similares a los propios de las células del campo ocular frontal. Sin embargo, las células de la corteza parietal posterior respondían mejor a estímulos mayores, por ejemplo, a puntos de luz de cinco grados de diámetro.

Cuando los monos respondían a tal estímulo con un movimiento en sacudida, las células de la corteza parietal posterior que estábamos registrando mostraban una respuesta reforzada. La respuesta denotaba especificidad espacial: sólo se detectaba cuando el movimiento sacádico iba dirigido a un estímulo del campo receptor de la célula, pero no cuando se orientaba hacia otro punto cualquiera. Recordaba la respuesta observada en el colículo superior y en el campo ocular frontal.

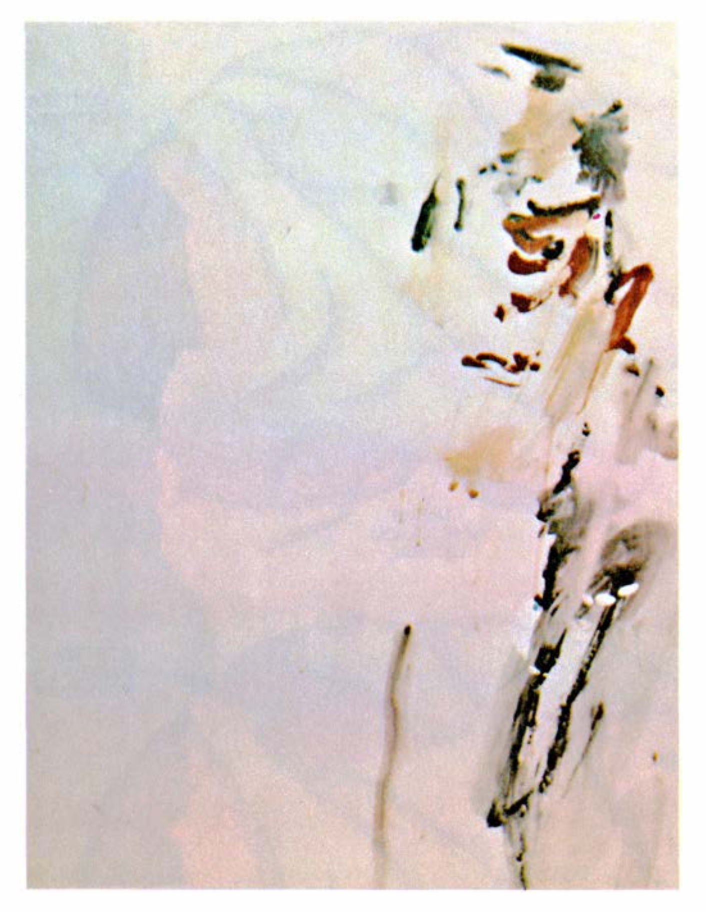
Nuestro siguiente experimento consistió en que el mono mirara un punto de fijación y atendiera a la atenuación de un estímulo periférico levantando la presión de la palanca. Detectamos en este caso una respuesta aumentada. Para confirmar que tal respuesta de la corteza parietal posterior no dependía de los movimientos oculares, diseñamos otro experimento. Como antes, el mono tenía que mirar hacia un punto de fijación. En algunos casos, sin embargo, el punto de fijación se atenuaba y el mono dejaba de presionar la palanca para recibir su recompensa. En otros casos, el mono debía tocar un panel iluminado sin apartar su mirada del punto de fijación. Si el panel se encontraba en el campo receptor de la célula cuya actividad estábamos registrando, la célula mostraba una res-

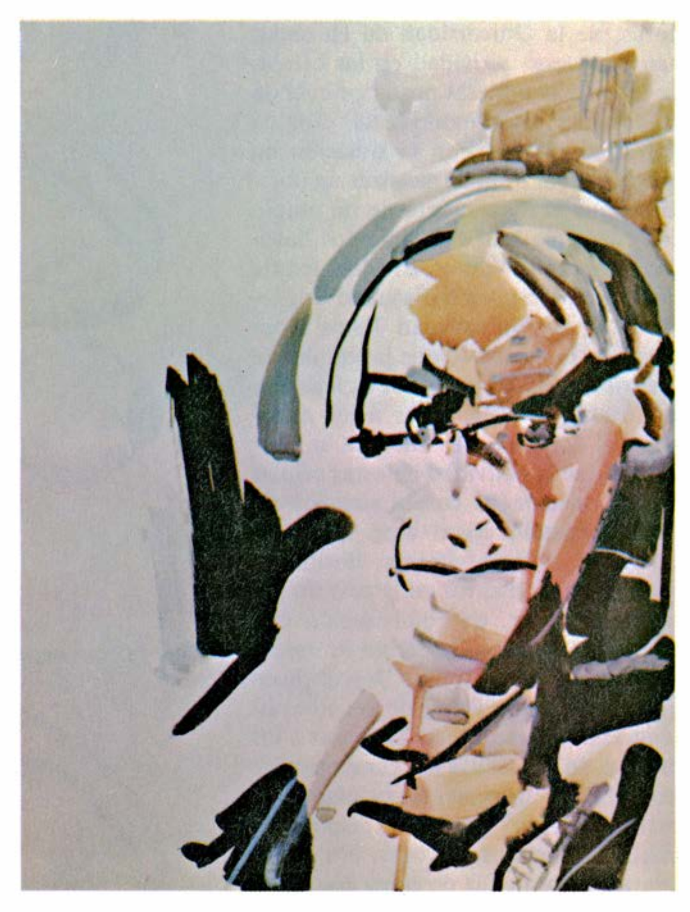


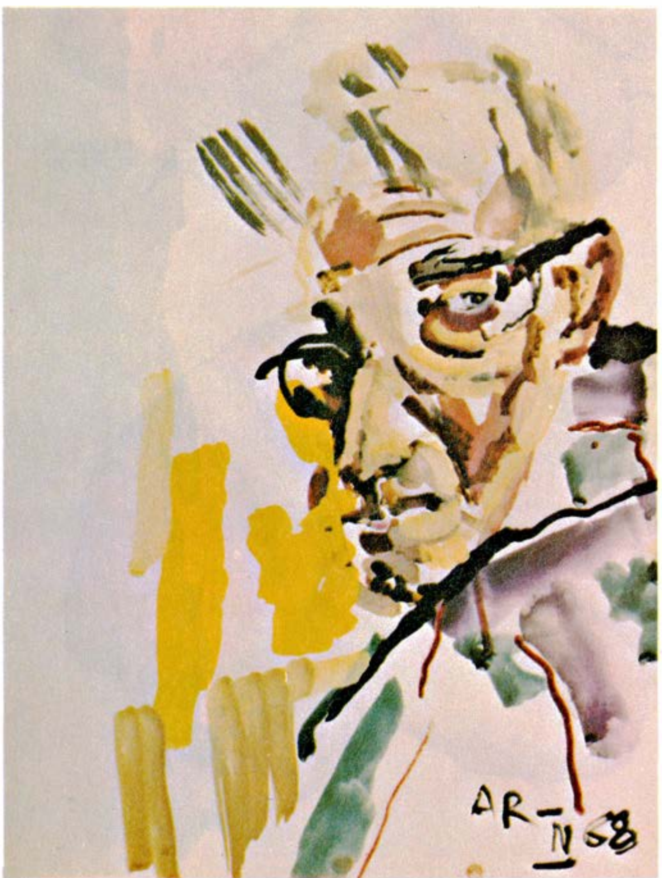




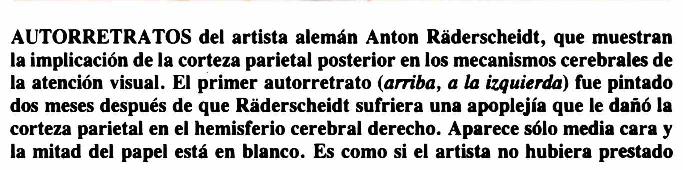
LAS AREAS CEREBRALES que responden con actividad eléctrica reforzada a estímulos visuales que pueden deducirse de los experimentos llevados a cabo por los autores en los Institutos Nacionales de la Salud. Los estímulos visuales activan la vía que conduce a la corteza estriada a través del cuerpo geniculado lateral (*a*). Los estímulos visuales que constituyen el blanco de un movimiento en sacudida activan de forma preferente el colículo superior, el campo ocular frontal y la corteza parietal posterior (*b*). Los estímulos visuales a los que el mono presta atención activan de forma preferente la corteza parietal posterior (*c*), estructura que bien pudiera formar parte del sustrato neural de la atención visual.











AUTORRETRATOS del artista alemán Anton Räderscheidt, que muestran la implicación de la corteza parietal posterior en los mecanismos cerebrales de la atención visual. El primer autorretrato (*arriba, a la izquierda*) fue pintado dos meses después de que Räderscheidt sufriera una apoplejía que le dañó la corteza parietal en el hemisferio cerebral derecho. Aparece sólo media cara y la mitad del papel está en blanco. Es como si el artista no hubiera prestado atención a la mitad izquierda del campo visual. El segundo autorretrato (*arriba, a la derecha*) lo realizó Räderscheidt tres meses y medio después de la enfermedad; el tercero (*abajo, a la izquierda*), seis meses después, y el cuarto (*abajo, a la derecha*) nueve meses después de sufrir el ataque de apoplejía. Los autorretratos los coleccionó Richard Jung, de la Universidad de Freiburg, y se publican aquí por cortesía de Gisele Räderscheidt, viuda del artista.

puesta reforzada. La actividad de la célula era tan intensa como en la situación en la que el mono realizaba un movimiento sacádico hacia el panel.

La respuesta aumentada de las células de la corteza parietal posterior mostraba especificidad espacial y era independiente de la acción particular que el mono tomara para con el estímulo. En ello se diferenciaba de la respuesta reforzada de las células del colículo superior y del campo visual frontal. También concordaba con la experiencia clínica de que la corteza parietal posterior participa en la atención visual.

El fenómeno de la potenciación sugiere un mecanismo neural a través del cual el mono selecciona objetos del campo visual y los convierte en objetivos de sus movimientos en sacudida. La retina manda información a una serie de neuronas cerebrales que descifran el mundo visual. Si el mono está alerta pero no atiende a nada en particular, la respuesta de tales células nerviosas es relativamente uniforme. Cuando el mono dirige su atención a algún objeto, las células nerviosas de la corteza parietal posterior relacionadas con el objeto, por formar éste parte de su campo receptivo, experimentan descargas más intensas. Si el mono decide dirigir un movimiento en sacudida hacia el objeto a fin de examinarlo más de cerca, las células del colículo superior y del campo ocular frontal relacionadas con el objeto experimentarán también descargas intensas. Tales respuestas cambian la actividad uniforme de las áreas visuales, de suerte que la actividad de las células nerviosas que responden a un objeto es mayor que la de aquellas que responden a otros. Tal cambio ocurre incluso cuando el objeto seleccionado no destaca de entre el resto del campo visual. La única diferencia es que el mono ha decidido prestar atención a tal objeto.

No sabemos aún cómo aparece la respuesta de estas células, y en ausencia de tal información es tentador postular que ella misma explique la atención visual. No obstante, podría tratarse simplemente de un fenómeno concomitante con la atención visual, es decir, que acompaña a la atención visual de igual forma que lo hace un movimiento ocular, sin formar parte del mecanismo neural responsable de la atención. De todos modos, haber detectado una actividad cerebral que se incrementa con la atención visual significa, al menos, que hemos empezado a explicar un concepto psicológico en términos fisiológicos.

La Sociedad Lunar de Birmingham

Este grupo provinciano de fabricantes, inventores y científicos, que fijaban sus reuniones por la luna llena, transformó el saber y la técnica británicas de las postrimerías del siglo XVIII

Lord Ritchie-Calder

En 1764, William Small regresaba a Gran Bretaña procedente de Virginia, donde había sido profesor de filosofía natural de Thomas Jefferson, en el Colegio de William and Mary. Inmediatamente comenzó a buscar algún lugar donde ejercer la medicina. Benjamin Franklin, que a la sazón se encontraba en Londres para combatir el acta del timbre (*Stamp Act*), le proporcionó a Small una carta de presentación para su amigo Matthew Boulton, un fabricante de Birmingham. La carta, que recomendaba a Small como "filósofo sutil y hombre honesto y respetable", condujo a la formación de la Sociedad Lunar de Birmingham, una de las tertulias más importantes de la historia de la ciencia y la técnica. Los miembros de esta sociedad, además de realizar muchas contribuciones individuales, personificaron la conjunción de tres acontecimientos históricos: la Revolución Americana, la Revolución Francesa y la Revolución Industrial.

El nombre escogido por el grupo procede de su costumbre de reunirse a comer el lunes más próximo a la noche de luna llena, con el propósito de que ésta iluminara su camino de regreso a casa. Por ello, y quizás inevitablemente, recibieron el apelativo de "lunáticos". Los tres primeros componentes fueron Small, Boulton y Erasmus Darwin, cada uno de los cuales desempeñó un importante papel en la difusión de la influencia de la sociedad.

Small había nacido en Escocia en 1734, siendo educado en el Marischal College de Aberdeen, donde aprendió matemática, filosofía natural, lenguas clásicas, química, anatomía, *materia médica* (farmacología), cirugía y obstetricia, materias cuyo estudio se exigía para graduarse en medicina en Escocia. A los 24 años se trasladó al William and Mary, a enseñar matemáticas, llegando muy pronto a ser profesor de filosofía natural, desde cuyo puesto explicaba la física newtoniana. Sus métodos didácticos se hicieron populares entre los estudiantes e insultantes para la facultad, ya que enseñaba en lengua vulgar y no en latín o griego. Uno de sus mejores alumnos fue Jefferson, que había sido admitido en la facultad a los 16 años. Jefferson se convirtió en el protegido de Small y de George Wythe, un miembro del foro de Virginia. El futuro presidente de los Estados Unidos prefirió, finalmente, el derecho y la política a la filosofía natural, pero, en su autobiografía, reconoce que "Small, probablemente, determinó el destino de mi vida".

Efectivamente, el joven profesor escocés debió hacer eso, y quizás aún más, pues, como señaló Woodrow Wilson, la Constitución de los Estados Unidos, que lleva la huella del pensamiento de Jefferson, se basa en una teoría de la dinámica política que debe mucho a la concepción newtoniana del universo. Esta Constitución establece un sistema de gobierno en el que la acción y la reacción son iguales y opuestas y se equilibran por las fuerzas que actúan sobre ellas.

Después de seis años en las colonias, la salud de Small se resintió al parecer, debido quizá más al clima de la facultad que al de Williambsburg, regresando a Aberdeen para completar su formación clínica. Con la ayuda de Franklin y Boulton, comenzó entonces a ejercer la medicina en Birmingham.

La amistad entre Boulton y Franklin databa de algunos años antes, cuando Franklin visitó Birmingham para colaborar con Boulton en algunos experimentos eléctricos. Desde entonces, ambos matenían correspondencia. En esa época, la principal ocupación de Boulton era la manufactura de varios productos metálicos, tales como hebillas para zapatos y pantalones, destinados sobre todo al provechoso comercio de exportación. Además, acuñaba monedas y, para los criterios de la época, era un hombre rico, que había heredado un floreciente negocio y se había casado con dos coherederas (su segunda esposa fue la hermana de la primera, después de morir ésta).

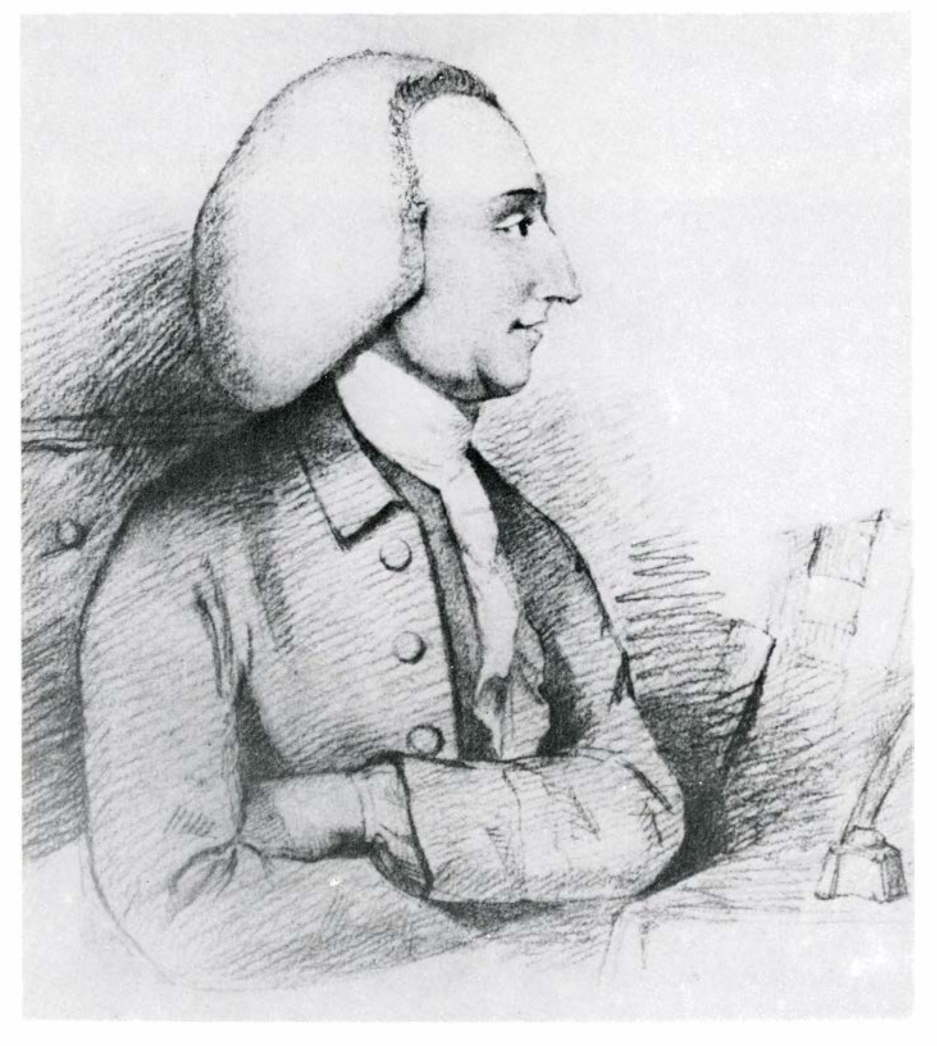
Cuando Small llegó a Birmingham, Boulton estaba ampliando sus negocios. Había construido una gran fábrica en Soho, en las afueras de Birmingham, y estaba mecanizándola con vistas a una producción industrial. Su fuente de energía era una corriente de agua que había aparejado para impulsar un molino. Como en verano no había bastante agua, Boulton tuvo la ingeniosa idea de elevar el agua del socaz a la represa del molino. Como para ello necesitaba una bomba, pensó en el modo de adaptar el ingenio de Savery, una de las primeras máquinas de vapor, en la que el propio vapor actuaba de pistón, aplicando la presión directamente a la superficie del agua. En 1766, transmitió

DOS ACTIVIDADES PRINCIPALES de los miembros de la Sociedad Lunar de Birmingham, la innovación tecnológica y la discusión filosófica, aparecen representadas en los grabados de la página contigua, los cuales proceden de un libro francés del siglo XIX sobre la máquina de vapor. El grabado superior muestra el interior de la fábrica de Soho, cerca de Birmingham, donde James Watt y su socio Matthew Boulton produjeron, desde 1775 hasta 1800, las piezas para sus máquinas de vapor. Ambos eran figuras destacadas de la Sociedad Lunar, que llegó a contar hasta con 14 miembros. El grabado inferior representa una reunión del "cercle des lunatiques" en casa de Watt. La sociedad tomó su nombre de la costumbre de reunirse el lunes inmediatamente anterior a la luna llena (visible en el fondo del grabado).

sus ideas, y un modelo, a Franklin, en Londres; mas por entonces éste se hallaba demasiado ocupado en asuntos políticos como para poder ofrecerle una ayuda eficaz. No obstante, el consejo de Franklin obtendría hoy la aprobación de los ecologistas: le prescribió a Boulton disponer la rejilla de la caldera "de modo que se consuma todo el humo".

Darwin, el tercer miembro fundador de la sociedad, era un floreciente, ilustrado y humanitario médico que había cursado sus estudios en la Universidad de Edimburgo. Fue también poeta, inventor ingenioso, aunque poco práctico, y evolucionista 60 años antes de que su nieto Charles Darwin turbase la paz de los teólogos al publicar *On the Origin of Species* (*Sobre el origen de las especies*). En su obra *Zoonomia; or, The Laws of Organic Life* (*Zoonomia o Las leyes de la vida orgánica*). Erasmus Darwin aportó razones plausibles para creer que las especies se originaban por transmutación. No obstante, como señaló Charles, su abuelo "anticipó los puntos de vista y bases erróneas de la doctrina de Lamarck", y no el principio de la selección natural. Erasmus Darwin fue también, a través de la hija de un segundo matrimonio, abuelo de Francis Galton, teórico de la eugenesia y estadístico. Según todas las referencias, era Erasmus un compañero jovial y un gran conversador, a pesar de un tartamudeo que mantenía por comodidad: "me da tiempo para reflexionar y me evita responder a preguntas impertinentes".

Con los años, la Sociedad Lunar llegó a contar con 14 miembros, aunque nunca comieron juntos más de diez. La reunión solía empezar a las dos en punto de la tarde y se prolongaba hasta alrededor de las ocho. Estas reuniones se celebraban en las casas de varios de los integrantes de las mismas, pero, en general, era Boulton el que se encargaba de convocarlas en los términos característicos siguientes: "Ruego recuerde que habrá luna llena el sábado, 3 de marzo". A fin de no inhibir la informalidad de las discusiones, no se tomaba ninguna nota de las mismas; no había orden del día, ni actas, ni resoluciones, ni programas de acción. (Un intento de Boulton, en 1776, por formalizar las reuniones, fracasó.) Lo que se sabe acerca de los temas discutidos procede de la correspondencia de los participantes y de los diarios de Mary Anne Schimmelpenninck, nacida Galton. Mrs. Schimmelpenninck era la hija de Samuel Galton (abuelo paterno de Francis Galton), un rico cuáquero en cuya casa, Great Barr, se reunía el grupo con frecuencia.



WILLIAM SMALL (1734-75) fue uno de los tres primeros miembros de la Sociedad Lunar. Natural de Escocia, enseñó matemática y filosofía natural desde 1758 hasta 1764 en el Colegio de William and Mary, de Virginia. De vuelta a Gran Bretaña, se estableció como médico en Birmingham, convirtiéndose en asesor científico y socio de Boulton y desempeñando un destacado papel en la firma Boulton & Watt. Este dibujo, que se conserva en la Birmingham Assay Office, es su único retrato contemporáneo conocido.

Sería difícil exagerar la influencia de la Sociedad Lunar en términos de los hombres que la componían. Era una sociedad de "mercaderes de luz", como Sir Francis Bacon (en *The New Atlantis*) llamó a los 12 miembros de la Casa de Salomón, cuyo cometido era buscar por todas partes los hechos relativos a la naturaleza y el hombre. El papel de los "lunáticos" en la Revolución Industrial fue decisivo. Es cierto que algunos acontecimientos de esta revolución les habían precedido: las invenciones de Richard Arkwright y Edmund Cartwright sobre el hilado y el tejido habían posibilitado la producción masiva de hilos y tejidos, y el cercado de tierras comunales había conducido al proletariado sin tierras a los molinos y fábricas. No obstante, la fuerza motriz industrial procedía aún de la rueda hidráulica. En ese sentido, la insatisfacción de Boulton con este último artificio para sus operaciones de acuñación tuvo trascendentales consecuencias.

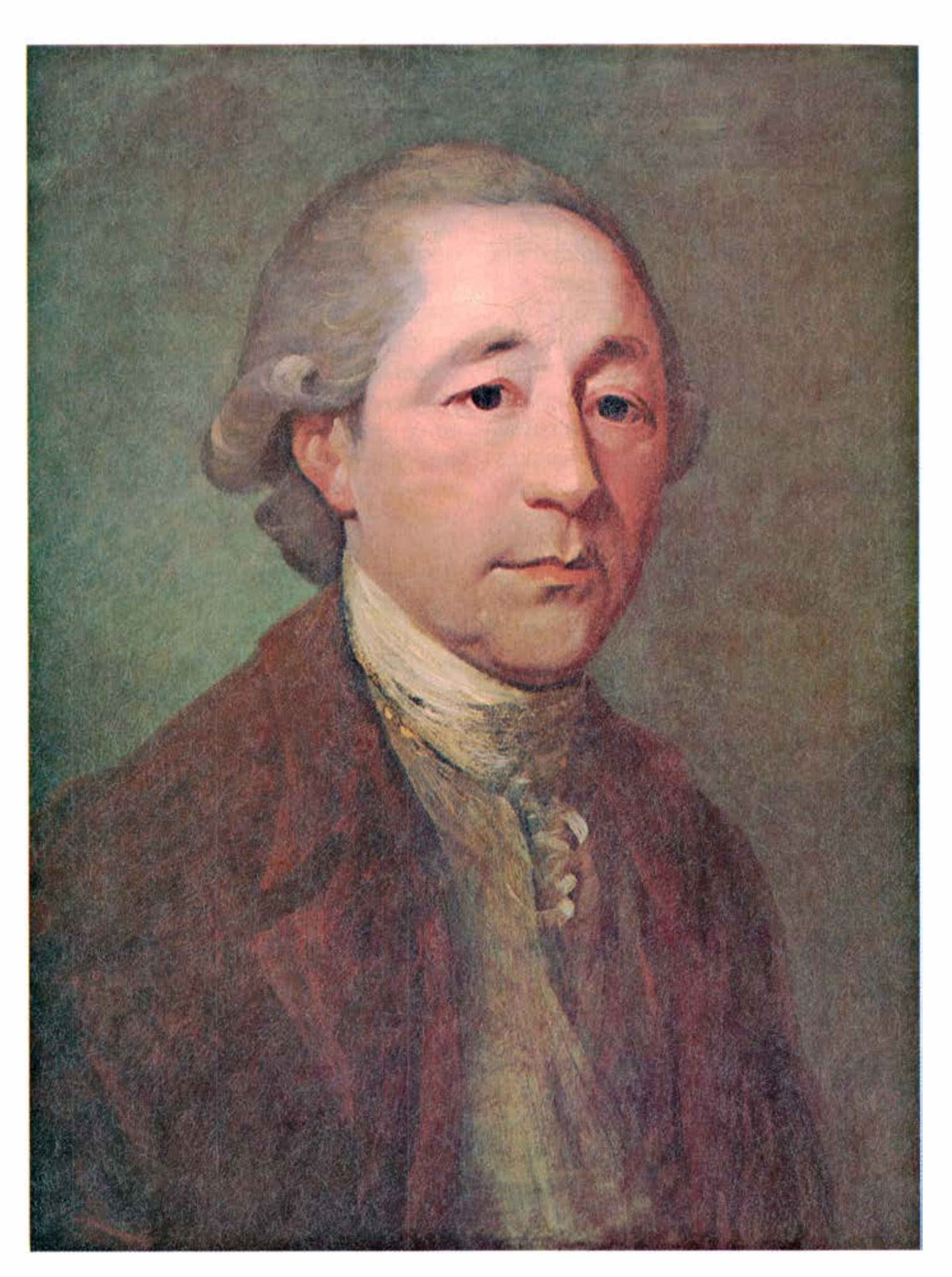
Franklin, que era socio correspondiente de la Sociedad Lunar, no había resultado muy útil en esta ocasión, pero el versátil Erasmus Darwin conocía a alguien que sí podía serlo: John Roebuck, quien también había estudiado medicina en la Universidad de Edimburgo. Roebuck abandonó la medicina por la industria y, con Samuel Garbett (otro miembro de la Sociedad), había fundado la primera factoría de ácido sulfúrico, en Prestonpans, en las cercanías de Edimburgo, y las ferrerías Carron, al sur de Escocia. Las actividades de Roebuck le habían llevado a relacionarse con un fabricante de instrumentos científicos de Glasgow llamado James Watt.

Watt, natural de Greenock, al oeste de Glasgow, no tenía más que estudios

primarios, que siguió en una escuela parroquial, y no había terminado su formación profesional como mecánico. A pesar de ello, tanto su habilidad técnica como su capacidad intelectual impresionaron a los profesores de la Universidad y uno de ellos, John Anderson, que enseñaba filosofía natural, le dio a Watt un modelo del ingenio de Newcomen para repararlo. En esas primeras máquinas de vapor, éste se introducía en un cilindro y movía un pistón; se enfriaba luego el cilindro para condensar el vapor y devolver el pistón a su posición original.

Watt advirtió el bajo rendimiento de este ciclo operativo y discutió el tema con otro cliente y amigo, Joseph Black, profesor de química. Black le explicó a Watt algo que hasta entonces sólo había discutido con sus estudiantes: la teoría del calor latente. El significado práctico de la nueva idea se le hizo manifiesto a Watt cuando paseaba por Glasgow Green. "No había andado más allá de la Golf House", recordaría, "cuando todo el asunto se aclaró en mi mente: la pérdida de calor podría evitarse manteniendo el cilindro a la temperatura del vapor y condensando el vapor en una caldera aparte". Hizo un modelo (incluyendo en él el dedal de su esposa) y Black se impresionó de tal modo que le prestó 1200 libras para continuar sus experimentos. El resultado fue el prototipo de la máquina de vapor con condensador.

Roebuck, consultando a Black, en calidad de químico industrial, acerca de la producción de soda sintética (carbonato de sodio), tuvo noticia de las ideas de Watt, y como se disponía a ocuparse de asuntos relativos con minas de carbón, advirtió las ventajas del ingenio de Watt para bombear el agua de los pozos. Pagó la deuda de Watt a Black y le proporcionó al primero un taller para construir una máquina de tamaño natural a cambio de una participación de dos tercios en los derechos de la patente.



MATTHEW BOULTON (1728-1809) era un próspero fabricante de productos metálicos de Birmingham cuando se asoció con Watt. Fue también miembro fundador de la Sociedad Lunar y se ocupaba de notificar a los otros miembros las fechas de las reuniones. Tras la muerte de Small, intentó, sin éxito, formalizar las actas de la sociedad. Esta pintura, anónima, se encuentra en la National Portrait Gallery.

Entretanto, los escasos recursos económicos de Watt le obligaban a ganarse la vida trabajando como supervisor de los asuntos del canal. De regreso a Escocia, cuando volvía de dar su informe ante la comisión del canal en Londres, se detuvo en Birmingham, donde Small le mostró las industrias de Soho y lo presentó a los miembros de la Sociedad Lunar. En una ulterior visita, Watt se encontró con Boulton, inaugurándose una asociación histórica. En 1769, Roebuck, financieramente en quiebra, vendió su participación en la patente de Watt a Boulton y a Small, que se había convertido en socio de Boulton.

Los subsiguientes éxitos en ingeniería de la firma Boulton & Watt no habrían sido posibles sin las contribuciones de otro miembro de la tertulia: John Wilkinson, un fabricante de cañones que construía excelentes máquinas para perforar cilindros. Wilkinson proporcionó los medios para alcanzar la precisión requerida en los cilindros de las máquinas de vapor de Boulton y Watt. Esas máquinas, mejoradas en diversos aspectos por Watt en años sucesivos, serían la fuerza impulsora de la fase más avanzada de la Revolución Industrial.

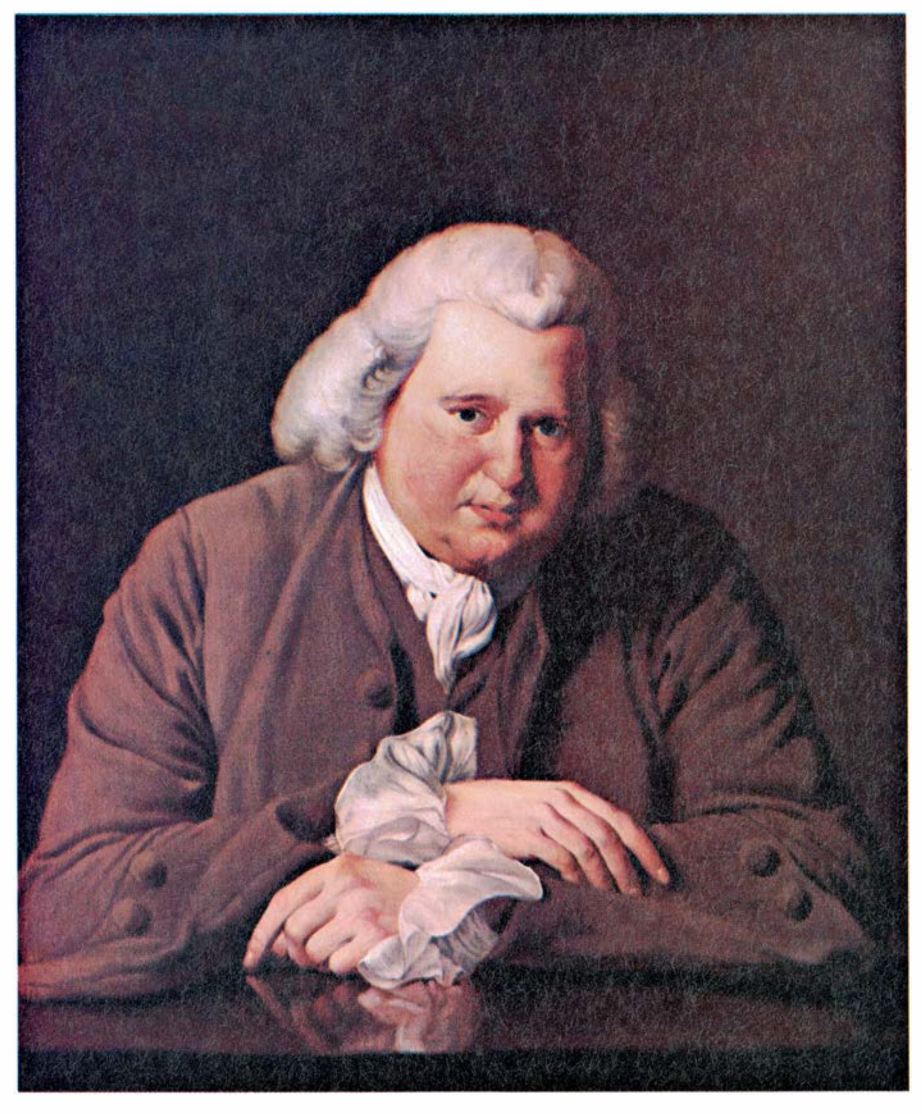
Watt se convirtió pronto en miembro regular de la Sociedad Lunar, la cual había iniciado ya un período de crecimiento significativo de su capacidad intelectual. Franklin había introducido en el grupo a su íntimo amigo Joseph Priestley. Profesor de una escuela religiosa disidente de Warrington, Cheshire, Priestley se había interesado por el trabajo de Franklin en electricidad y había hecho la larga jornada de viaje en diligencia a Londres para verle. Ambos tenían intereses comunes, no sólo en ciencia sino también en política: Priestley estaba profundamente comprometido en el apoyo a los colonos americanos. Por instigación de Franklin, Priestley escribió *The History and*

Present State of Electricity (*Historia y estado actual de la electricidad*), publicada en 1767, obra que incluye la primera descripción detallada del experimento de Franklin con el cometa-pararrayos. (Franklin nunca emprendió la redacción del experimento.)

Franklin consiguió el nombramiento de Priestley como bibliotecario del Conde de Shelburne, secretario de Estado para las colonias, en cuya casa Priestley llevó a cabo los experimentos que le condujeron al aislamiento del oxígeno (al que llamó "aire desflogisticado"). Años después, cuando las relaciones de Priestley con Shelburne se hicieron tensas –no a causa de la ciencia o la política, sino de la religión– Franklin lo rescató, escribiendo a Boulton, tal como había hecho en el caso de Small. Boulton y sus acomodados amigos de la Sociedad Lunar consiguieron para Priestley el nombramiento de pastor de la Iglesia Unitaria de Birmingham. No sólo aseguraron su remuneración como pastor, sino que, además, le proporcionaron secretamente fondos para desarrollar sus investigaciones.

Uno de los secretos patrocinadores de Priestley fue Josiah Wedgwood, el ceramista. Wedgwood, miembro también de la Sociedad Lunar, necesitaba la luz de la luna más que nadie, pues vivía en Hanley, Staffordshire, a 65 kilómetros de camino. Se introdujo en el negocio trabajando en el torno de alfarero, pero disponía de una mente brillante e inquisitiva, que aplicó a resolver los misterios milenarios de la cerámica. Su participación en la Sociedad Lunar no se limitó al virtuosismo intelectual; mientras Priestley oscurecía su propio descubrimiento del oxígeno con una persistente defensa de la teoría del flogisto, Wedgwood y otro "lunático", William Withering, expusieron a la Sociedad Lunar sus hallazgos sobre el significado de la oxidación. Wedgwood estaba muy familiarizado con las arcillas de color rojizo de las vasijas de uso doméstico y, con Withering, trató de encontrar arcillas no ferrosas para emplearlas en la fabricación de porcelana de calidad.

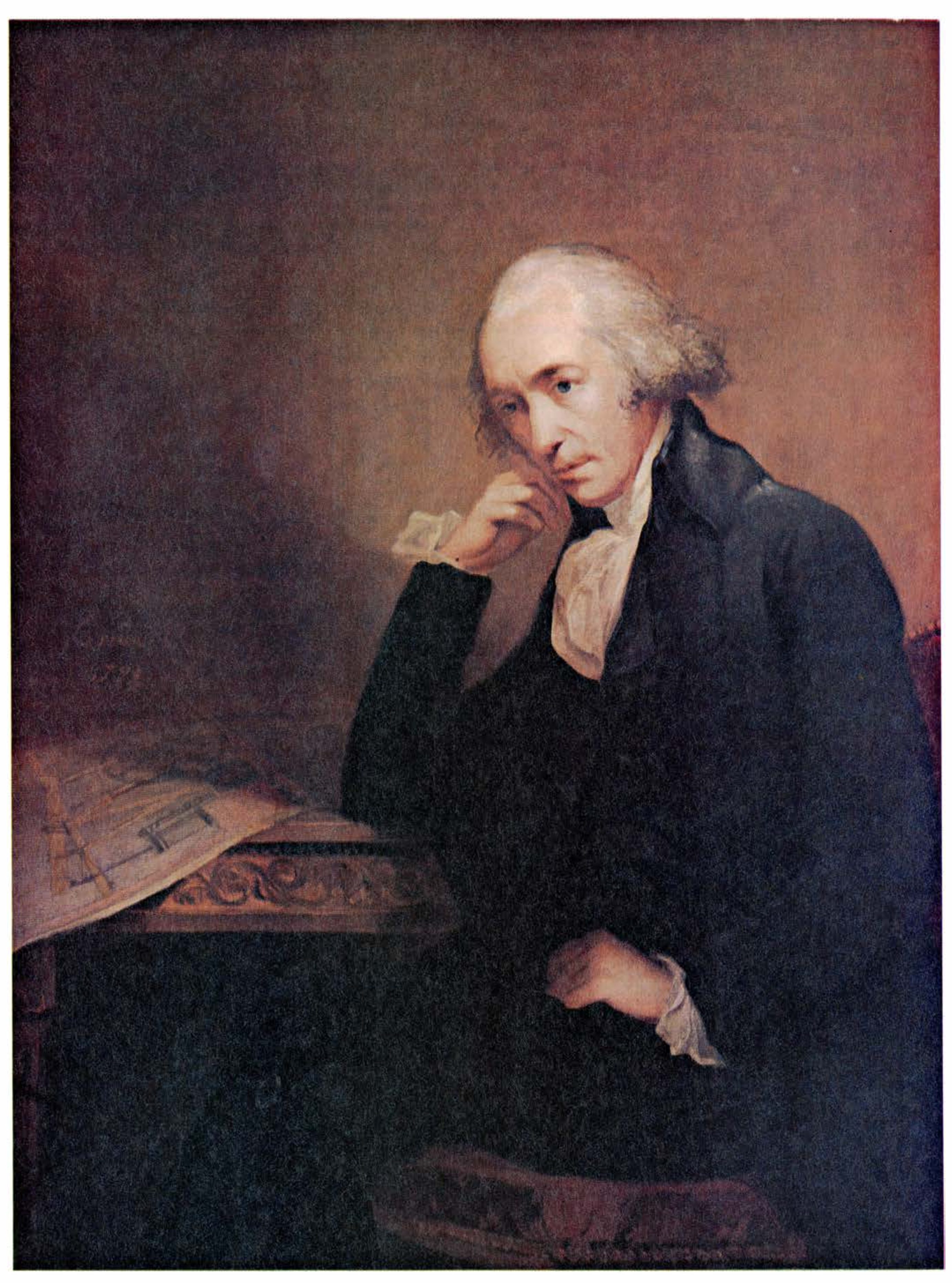
A Withering se le conoce en la historia de la medicina principalmente como el médico que introdujo el digital en el tratamiento de la hidropesía, una acumulación de fluidos, síntoma frecuentemente de una enfermedad del corazón. El descubrimiento lo realizó en sus visitas como médico rural, por medio de una mujer de Shropshire que administraba infusiones de digital (*Digitalis purpurea*) en casos de hidropesía. Withering recibió, en su época, el apelativo de "flor de los médicos". Fue epidemiólogo y, como tal, describió y documentó la propagación de la escarlatina. Estudió la respiración animal. Fue también un consumado intérprete a la flauta y al clavicordio, así como un geólogo cuyo nombre ha quedado perpetuado en mineralogía como el descubridor de la witherita, un carbonato de bario que distinguió de la baritina. (La witherita se usa para templar el acero, refinar el azúcar, en la manufactura de productos de arcilla, esmaltado de hierro y vidrio y como pintura de carga.)



ERASMUS DARWIN (1731-1802) fue el tercer miembro fundador de la Sociedad Lunar de Birmingham. Médico, poeta, inventor y escritor de diversos temas científicos, según todos los testimonios contribuyó muy activamente a las discusiones de la Sociedad Lunar. Además, fue abuelo de dos destacados científicos británicos del siglo XIX: Charles Darwin y Francis Galton. Este retrato al óleo, pintado por Joseph Wright en 1770, forma parte también de la colección que guarda la National Portrait Gallery de Londres.

Las arcillas y minerales que Withering y Wedgwood encontraron en sus trabajos de campo condujeron al desarrollo de las famosas vajillas de jaspe Wedgwood y a las porcelanas finas. Wedgwood llegó a ser miembro de la Royal Society, aunque no por su trabajo en mineralogía, química o estética de la alfarería, sino por su invención del pirómetro, un aparato que empleó para medir la temperatura de los hornos. También se convirtió, a través de su hija, en el abuelo de Charles Darwin y, a través de su hijo, en el de la esposa de Darwin, Emma Wedgwood. Además de sus otras muchas contribuciones, el patriarca de los Wedgwood fue un adelantado en el campo del estudio que ahora llamaríamos investigación operativa o análisis de sistemas. Hizo estudios comparativos de las roturas de sus envíos de vasijas cuando se transportaban por tierra o por agua. Lo que le llevó a defender vigorosamente el sistema de canales que pronto enlazó Gran Bretaña, del que formaba parte el Gran Trunk Canal que, extendiéndose desde el Mersey a través de las Wedgwood Potteries, llegaba hasta el Trent, y de él a Londres.

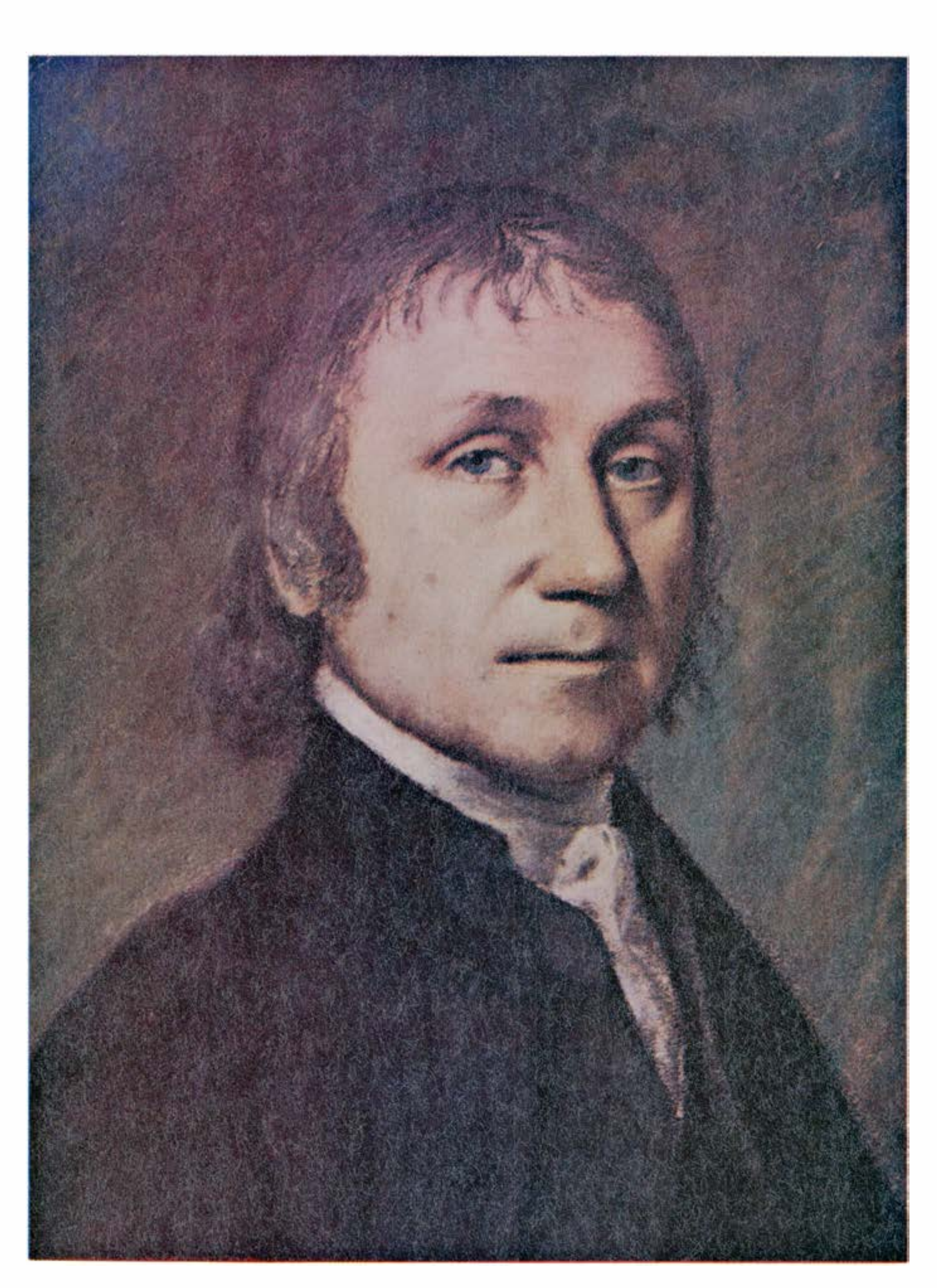
Otro destacado miembro de la Socie-



JAMES WATT (1736-1819) concibió el principio de la máquina de vapor con condensador en 1764, cuando era constructor de instrumentos científicos de la Universidad de Glasgow, a partir del ingenio de Newcomen. Ulteriormente se trasladó a Birmingham para unirse a Boulton y a sus asociados, convirtiéndose en socio de la empresa de ingeniería Boulton & Watt y en un miembro regular de la Sociedad Lunar. Aparece en esta reproducción de otra pintura de la National Portrait Gallery de Londres, cavilando ante el diseño de una de sus máquinas; la pintura la realizó Carl Frederick von Breda en 1792.

dad Lunar fue James Keir. Educado en la Edinburgh High School, fue condiscípulo de Erasmus Darwin en los estudios de medicina, en la Universidad de Edimburgo. Después de un período en el ejército, se estableció en Birmingham, donde Darwin lo presentó a Wedgwood y a Boulton. Cuando conoció a Keir, en la Sociedad Lunar, Watt lo describió como "excelente químico y hombre muy agradable". La principal contribución de James Keir a la Revolución Industrial fue su esquema para la producción industrial de álcalis.

También "lunático" fue William Murdock, a quien Sir Walter Scott describiera como "ese loco que se ha propuesto iluminar las calles de Londres con humo". Murdock, hijo de un molinero interesado por la ingeniería, entró tardíamente en la sociedad. Watt era ya hombre de fama en Birmingham cuando Murdock se trasladó desde Escocia a la fábrica de Soho para trabajar con él. Boulton le entrevistó, pero el desmañado joven no le impresionó especialmente hasta que dejó caer su sombrero de copa. El sombrero hizo un extraño ruido; Boulton lo recogió y comprobó que estaba hecho de madera. Murdock explicó que lo había fabricado él mismo, con una máquina de su invención que torneaba óvalos internos y externos. Fue contratado; es más, pronto perdió su timidez y se convirtió en un gran polemista de la Sociedad Lunar. Su principal contribución fue desarrollar métodos para producir, purificar y almacenar gas de hulla. La fábrica de Soho se iluminó con luz procedente de lámparas de gas para celebrar la Paz de Amiens, en 1802. La firma Boulton & Watt, en la que Murdock trabajó por el resto de su vida, no promocionó su otra invención: una locomotora que podría haberse anticipado al logro de Richard Trevithick de poner la máquina de Watt sobre ruedas.



JOSEPH PRIESTLEY (1733-1804) fue presentado en la Sociedad Lunar por uno de sus miembros correspondientes, Benjamin Franklin. En 1780 Priestley se trasladó a Birmingham, donde Boulton y sus amigos le consiguieron el nombramiento de pastor de la Iglesia Unitaria y le proporcionaron fondos para desarrollar su investigación. Priestley es conocido sobre todo como descubridor del oxígeno, aunque en los debates con sus compañeros de la Sociedad Lunar persistió en la defensa de la teoría del flogisto, de acuerdo con la cual el recientemente aislado gas era "aire desflogisticado". Este retrato al pastel, que se halla depositado también en la National Portrait Gallery de Londres, fue realizado por Ellen Sharples.

En su época, una sesión de la Sociedad Lunar debió parecer una reunión de antiguos alumnos de la facultad de medicina escocesa: Small, Darwin, Roebuck, Keir y Withering. Además, Watt y Murdock eran escoceses, si bien sin formación universitaria, y Priestley se había recibido de doctor en leyes por Edimburgo.

Se explica la asociación entre la medicina y la ciencia aplicada, así como la preeminencia de Edimburgo. Las universidades de Oxford y Cambridge estaban dominadas entonces por el interés hacia la teología, aunque sus enseñanzas se basaban en las ciencias matemáticas, que incluían no sólo la matemática sino también la astronomía, mecánica y óptica. Con todo, la física era especulativa y, la química, empírica; la biología era un estudio de colecciones; la geología virtualmente no existía, circunscrita aún por la fecha de la Creación, establecida, por el arzobispo James Ussher, en el 4004 a.C. Sólo en dos universidades europeas se enseñaba la ciencia de manera teórica y práctica: en Edimburgo y en la Universidad de Leiden. En las facultades médicas de estas universidades se dedicaba tanta atención a la ciencia de la medicina como a su praxis.

De ahí que los mejores entre los aspirantes a médico en la Gran Bretaña del siglo XVIII se inclinaran por Edimburgo o Leiden (o por ambas). Estas dos universidades se habían fundado después de la Reforma, Leiden en 1575 y Edimburgo en 1583. Eran laicas y abiertas a todos los credos. Desde el principio mantuvieron estrecha asociación, pero en el siglo XVIII la enseñanza era virtualmente intercambiable. En 1692, Alexander Pitcairne, fundador del Royal College of Physicians de Edimburgo, fue nombrado catedrático de medicina de Leiden. Uno de sus alumnos fue Hermann Boerhaave, que le sucedió en Leiden y cuyas lecciones de química

ejercerían un profundo efecto en el pensamiento europeo. A fines del siglo XVIII, alrededor de 40 catedráticos de las universidades escocesas se habían educado, al menos en parte, en Leiden.

La facultad de medicina de Edimburgo proporcionaba una excelente formación científica y muchos de sus graduados se apartaron de la medicina al aplicar sus conocimientos científicos. James Hutton, por ejemplo, se graduó en medicina, pero se valió de la química que había aprendido con tal provecho que comercializó un proceso para fabricar cloruro de amonio; nunca ejerció como médico, pero amasó una fortuna y llegó a ser uno de los fundadores de la ciencia de la geología. De los otros graduados en medicina en Edimburgo, Roebuck aportó a la Revolución Industrial, entre otras cosas, su ácido sulfúrico y, Keir, sus álcalis.

Richard Lovell Edgeworth fue un miembro regular de la Sociedad Lunar. Era un rico propietario, con bienes en Irlanda e Inglaterra, pero congenió con los "mercaderes de luz" de la región industrial de Midlands. Sus intereses técnicos eran modestos: inventar, o mejor, diseñar elegantes carruajes, particularmente el faetón, un vehículo ligero con grandes ruedas, asientos altos y sin ventanas. Lovell frecuentaba a Jean Jacques Rousseau, por instigación del cual escribió el libro *Practical Education* (*Educación Práctica*), en colaboración con su hija María. Sostenía que la educación debía basarse en la comprensión de la mente del niño y considerarse ciencia experimental, en la que debía anotarse y analizarse la conversación. Sus 22 hijos (de cuatro esposas) le proporcionaron el material para sus propios experimentos.

Edgeworth comprendió bien el papel de la Sociedad Lunar. Escribió: "Una sociedad de hombres de letras y una sociedad literaria pueden ser muy diferentes. En el primer caso, los hombres ofrecen los resultados de sus serias investigaciones y detallan sus elaborados pensamientos. En el segundo, las primeras indicaciones de descubrimientos, observaciones en curso y contraste mutuo de ideas son de la mayor utilidad. Los conocimientos de cada miembro de una sociedad tal se difunden con el tiempo entre todos los demás, y un cierto *esprit de corps*, no contaminado por los celos, combina en algún grado los talentos de los miembros, trascendiendo los puntos de vista individuales". Destacaba el hecho de que la Sociedad Lunar no fue una "sociedad erudita" sino una sociedad sin reglas, en la que no había jerarquía de saber. Había en ella acaloradas discusiones en las que cualquiera de los socios podía iniciar una encendida disputa, sin resentimiento en cualquiera de las partes implicadas.

Esta cualidad se hizo patente en las discusiones de la sociedad en torno a la teoría del flogisto, formulada originalmente por el físico y químico alemán Georg Ernst Stahl. Afirmaba la teoría que una sustancia hipotética, el flogisto, era el principio de la combustión, de modo que las sustancias que se quemaban estaban compuestas de flogisto y la combustión se producía porque el flogisto se separaba de la sustancia. Priestley mantenía esta posición contra Keir, decidido antiflogista.

La obstinación de Priestley con el "principio del fuego" le impidió apreciar el significado de sus propios hallazgos, incluido lo que describió como "un mero experimento al azar, realizado para entretener a un pequeño grupo de amigos filósofos que habían constituido una sociedad privada de la que me hicieron el honor de hacerme miembro, a saber, la Sociedad Lunar". En el experimento, Priestley había hecho estallar "aire inflamable" (hidrógeno) y "aire desflogisticado" (oxígeno) con una chispa eléctrica, produciéndose rocío en el recipiente de vidrio.

En abril de 1783, Priestley le dijo a Watt que el peso del agua formada era igual al peso de los dos gases. Watt replicó inmediatamente que el experimento mostraba que el agua no era un elemento, sino un compuesto. Ulteriormente escribió a Priestley: "¿Cuáles son los productos de su experimento? Agua, fuego y calor. ¿No estamos, por tanto, autorizados a concluir que el agua es un compuesto de los dos gases, oxígeno e hidrógeno, privados de una parte de su calor latente, o elemental, y que el oxígeno es agua privada de su hidrógeno pero todavía unida a su fuego y calor latente? Si el fuego es sólo una modificación del calor, o una simple circunstancia de su modificación, o una parte componente del hidrógeno, el gas oxígeno será agua privada de su hidrógeno pero combinada con calor latente".

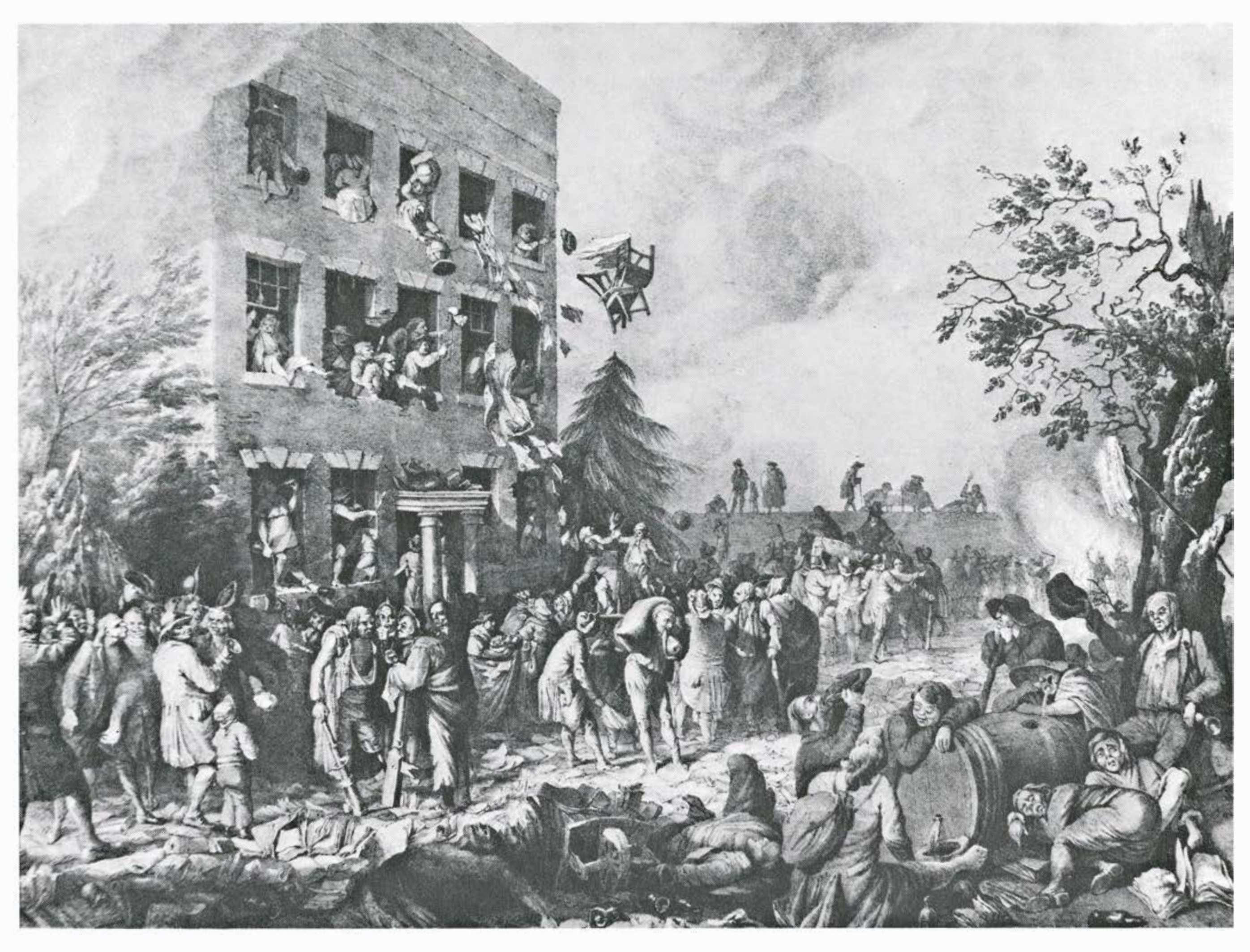
Se trataba tan sólo de un intercambio de ideas entre dos socios de un club. Quedó para Henry Cavendish describir la composición del agua, aún en términos del flogisto, en la Royal Society en 1784, y para Antoine Laurent Lavoisier mostrar que Cavendish se había equivocado al pensar que el elemento agua preexistía en los gases y redefinir dicho supuesto elemento en términos de oxígeno e hidrógeno. A pesar de todo, Priestley persistió en la defensa del flogisto y todavía en 1800 publicó su *Doctrine of Phlogiston Established, and that of the Composition of Water Refuted* (*La doctrina del flogisto establecida y la de la composición del agua refutada*).

Los "lunáticos" gustaban de ocuparse de cualquier tema –poesía, religión, arte, política, música, ciencia– con las mentes abiertas como las fajas de sus calzones. El suyo fue el espíritu de indagación universal propio de los días anteriores a la fragmentación de la base común del conocimiento en diversas especialidades.

Sus actitudes políticas les ocasionaron problemas. La Revolución Francesas progresaba y los miembros de la Sociedad Lunar, que se habían mostrado tolerantes hacia los colonos de la Revolución Americana, se situaron análogamente del lado de los revolucionarios franceses. El hijo de Watt había sido denunciado por Edmund Burke a la Cámara de los Comunes como agente francés. Priestley abandonó su química y se convirtió en un vigoroso defensor de la Asamblea Nacional, que le ofreció la ciudadanía francesa y lo nombró miembro de la Convención Nacional, honor que rehusó. Fue también denunciado por Burke.

El 14 de julio de 1791 Keir organizó una comida en la posada más importante de Birmingham para celebrar el segundo aniversario de la caída de la Bastilla. A dicha comida asistieron alrededor de 80 simpatizantes. Una multitud se congregó alrededor de la posada gritando: "¡Iglesia y Rey!" y rompió las ventanas. Su blanco principal, no obstante, fue Priestley, que se encontraba en su casa. Fueron a la New Meeting House, de la que Priestley era pastor, y le prendieron fuego. Luego se dirigieron a Fairhill, a dos kilómetros y medio de distancia, pero Priestley había sido advertido y escapó con su familia. La multitud destruyó sus aparatos y prendió fuego a la casa. Sus manuscritos, el trabajo de 20 años, fueron dispersados por el campo.

Los otros "lunáticos" fueron también blanco de la multitud. Boulton y Watt se refugiaron en la fábrica de Soho y armaron a sus trabajadores para resistir el asedio. Pero aquel grupo de exaltados había encontrado casas con bodegas bien repletas de vino y se entretuvieron de otro modo. Priestley dejó Birmingham y llevó a su familia a Londres. Posteriormente emigró a América, donde dedicó su tratado sobre *Experiments on the Generation of Air*



DESTRUCCION DE LA CASA DE PRIESTLEY, en Fairhill, en 1791. Fue consecuencia de su apoyo a los ideales republicanos de la Revolución Francesa. (Los miembros de la Sociedad apoyaron también, en su momento, a los colonos norteamericanos.) La turba se concentró el atardecer del 14 de julio en protesta de una comida celebrada para conmemorar el segundo aniversario de la caída de la Bastilla. Aunque Priestley no asistió al ágape, pronto sería el objetivo principal de los revoltosos. Logró escapar, junto con su familia, pero se destruyeron sus aparatos, se desperdigaron sus escritos y se prendió fuego a su casa. Priestley nunca volvió a Birmingham, y más tarde emigró a América. La litografía, reproducida por cortesía de las Birmingham Public Libraries, es copia de una pintura atribuida a un artista local contemporáneo, de nombre Exted, que se supone la realizó en el mismo lugar de los hechos.

from Water (*Experimentos sobre la generación de aire a partir de agua*) a sus "estimados amigos, los miembros de la Sociedad Lunar de Birmingham".

La Sociedad Lunar dio nueva vida a la ciencia británica, que desde el gran desarrollo científico que tuvo lugar a mediados del siglo XVII, con Newton y sus contemporáneos, había ido declinando. A los *virtuosi* fundadores de la Royal Society, bajo el patronazgo de Carlos II, les habían sucedido los *dilettanti* de la primera mitad del siglo XVIII. La Royal Society necesitaba una transfusión de sangre roja (para compensar la sangre azul) e ideas estimulantes, todo lo cual llegó con la Revolución Industrial y con los "lunáticos", que ayudaron a realizarla. La Royal Society renació cuando hombres como Boulton, Watt, Priestley, Wedgwood y Franklin se sumaron a ella procedentes de la Sociedad Lunar.

Entretanto, iban brotando otras instituciones extraoficiales. En Glasgow, Anderson, amigo de Watt, había establecido sus clases "anti-toga", punto de partida de la educación para adultos de las clases trabajadoras. Los artesanos acudían a ellas, en gran número, con sus ropas de trabajo (de ahí el apelativo "anti-toga"). Más de 200 artesanos asistían al curso de Anderson de filosofía natural que tenía lugar los martes y jueves por la tarde, cinco horas a la semana. La iniciativa de Anderson (ahora incorporada en la Universidad de Strathclyde) condujo al establecimiento de los institutos de mecánica por toda Gran Bretaña. También sirvió de ejemplo para la Royal Institution de Londres, fundada por Benjamin Thompson, el *tory* americano que llegó a Conde de Rumford. Esta última institución se estableció "para impartir, a través de cursos regulares, lecciones de filosofía y realizar experimentos; aplicar los nuevos descubrimientos científicos al perfeccionamiento de las artes y manufacturas y facilitar los medios de conseguir las comodidades y bienes necesarios para la vida". En la galería de la Royal Institution fue donde Michael Faraday, a la sazón aprendiz de encuadernador, escuchó las lecciones de Sir Humphrey Davy.

Al cambiar el siglo, la Sociedad Lunar había abandonado la actividad, pero su influencia persistía. El político *whig* Francis Horner comentó en 1809: "La huella que dejaron aún no se ha borrado; se muestra, a las generaciones segunda y tercera, en forma de un espíritu de libre examen y curiosidad científica, que todavía ofrecen alguna resistencia a las fuerzas combinadas del metodismo, *torysm* (conservadurismo) y afán de lucro".

Temas metamágicos

Donde se habla del Nomic, un juego grandioso que explora la reflexividad de las leyes y los estatutos

Douglas R. Hofstadter

En su excelente libro *A Profile of Mathematical Logic*, el filósofo Howard DeLong relata el siguiente episodio de la Grecia clásica. "Protágoras fue contratado por Euathlos –quien pretendía ser abogado– para que le enseñase retórica. Euathlos pagó en principio solamente la mitad de la fuerte suma estipulada, conviniendo ambos en que el segundo plazo fuese abonado una vez que Euathlos hubiese ganado su primer pleito. Sin embargo, Euathlos fue posponiendo el momento de comenzar su carrera forense por tanto tiempo, que Protágoras, igualmente preocupado por su reputación como por su dinero, decidió demandar a Euathlos ante los tribunales. En la vista, Protágoras argumentó así:

"'Euathlos sostiene que no tiene por qué pagarme, pero su razonamiento es absurdo. Pues supongamos que él alcanzase a ganar este pleito. Siendo ésta su primera presentación ante el juzgado, debería pagarme por haber ganado su primera demanda. Por otra parte, supongamos que lo pierda. Tendría entonces que pagarme por así dictaminarlo el tribunal. Y puesto que forzosamente habrá de ganar o perder el pleito, está obligado a pagarme'.

"Euathlos había sido discípulo aprovechado y pudo replicar a su maestro con un razonamiento parecido, esta vez de su cosecha:

"'Protágoras sostiene que yo debo pagarle; aunque esto es lo absurdo. Pues supongamos que él llega a ganar el pleito. No habiendo yo ganado mi primer caso, según nuestro acuerdo no tengo obligación de pagarle. Y por otra parte, supongamos que sea él quien lo pierda. Entonces, yo no tendría que pagarle, por así fallarlo el tribunal. Y puesto que forzosamente ha de ganar o perder el pleito, yo no tengo por qué pagarle.'"

Y apostilla DeLong: "Salta a la vista que para desenmarañar rompecabezas como éste es preciso examinar cuáles son los procedimientos generales de la argumentación." La verdad es que a muchas personas no les parece tan evidente. Muy al contrario. Muchos consideran que paradojas como ésta sólo son meras verrugas en el rostro de la jurisprudencia, fácilmente eliminables con un poco de cirugía estética. De igual forma, muchas personas que se toman seriamente la teología opinan que las paradojas suscitadas por la noción de omnipotencia, tales como "¿Podrá Dios crear una piedra tan pesada que ni El pueda alzarla?" son juegos de palabras infantiles, y no serios dilemas teológicos, charadas fácilmente resolubles de manera sencilla y definitiva. A través de la historia se han propuesto parches y remiendos simplistas para romper los círculos viciosos planteados por dilemas como éste. Tenemos un famoso ejemplo en la teoría de tipos creada por Bertrand Russell. Como descubrió el propio Russell, las paradojas no quedan tan fácilmente resueltas. Enraizadas profundamente, lo invaden todo, y en los esfuerzos por desenmarañarlas nos vemos llevados por los más inesperados senderos.

De hecho, en jurisprudencia, disciplina pragmática y firmemente asentada en tierra, dilemas análogos al de Protágoras contra Euathlos afloran con admirable regularidad. Empero, su fundamental importancia para definir y comprender la naturaleza de las leyes ha pasado desapercibida. Tanto, que durante estos últimos años sólo un puñado de artículos especializados dedicados a la cuestión se han publicado en revistas de jurisprudencia o de filosofía.

Sentí por tanto sorpresa y alegría cuando me enteré de que se estaba preparando nada menos que un libro acerca del problema de la reflexividad en derecho. La primera noticia que tuve al respecto –*The Paradox of Self-Amendment: A Study of Logic, Law, Omnipotence, and Change*– fue por una carta de su autor, Peter Suber, quien se presentó como doctor en filosofía y alumno de la Facultad de Derecho de Chicago. Hace de ello más de un año. En el ínterin, Suber ha terminado su licenciatura en leyes, y se ha empleado como profesor de filosofía en el Earlham College de Richmond, confiando en que pronto *The Paradox of Self-Amendment* vea la luz.

Por mi correspondencia con Suber he sabido que tiene "en taller" otro libro aún más ambicioso, provisionalmente titulado *The Anatomy of Reflexivity*. En él está haciendo un estudio de la reflexividad, en su acepción más amplia, que abarca –me dice–, "la autoalusión de signos, sibiaplicabilidad de principios, la autovalidación y autorrefutación de proposiciones e inferencias, la autocreación y autodestrucción de entes legales o lógicos, la autolimitación y autoampliación de poderes, las formas de razonamiento circular y de causalidad circular, los círculos viciosos y benignos, los sistemas realimentados, la dependencia mutua y la mutua causalidad y reciprocidad".

En su primera carta, Suber no sólo me mostró cierto número de ejemplos interesantes de auto-alusión en jurisprudencia, sino que presentó también un juego que ha bautizado Nomic (del griego *nomos*, "ley"), que aparecerá como apéndice de *The Paradox of Self-Amendment*. La lectura de sus reglas es una de esas experiencias que nos dan amplitud de miras. Gran parte de este artículo estará dedicada al Nomic, pero antes de que nos enzarcemos con él me gustaría preparar el escenario comentando algunos ejemplos de reflexividad en el ruedo político.

Mi amigo Scott Buresh, que es jurista, me explicó el siguiente y paradójico dilema, que como hipótesis se planteó en clase de derecho constitucional. ¿Qué sucedería si el Congreso de los Estados Unidos aprobase una ley estableciendo que en lo sucesivo todos los dictámenes del Tribunal Supremo tuvieran, para ser válidos, que aprobarse por mayoría de dos tercios (6 contra 3) en lugar de la mayoría simple actualmente requerida? Imaginemos que esta ley fuese impugnada en los tribunales, y que el caso se abre finalmente camino hasta el propio Tribunal Supremo. El alto tribunal decreta que tal ley es anticonstitucional y –no vale la pena decirlo– tal acuerdo se toma por mayoría de 5 contra 4. ¿Qué pasaría? Es esta una clásica paradoja suscitada por la separación de poderes. Esta paradoja tuvo su escenografía con ligeras variaciones, durante la era del Watergate, cuando el Presidente Nixon amenazó con obedecer sólo la disposición del Tribunal Supremo que le ordenaba la entrega de las cintas si tal decisión era "definitiva", lo que presumiblemente significaba algo así como decisión por unanimidad.

Vale la pena destacar que los conservadores están ahora esforzándose en limitar la jurisdicción del Tribunal Supremo en materias tales como el aborto y la oración en las escuelas. Los estudiosos de la constitución estiman que puede llegarse a una confrontación decisiva si el Congreso llega a aprobar un estatuto semejante y se solicita después del Tribunal Supremo que dictamine acerca de su constitucionalidad.

Pueden presentarse conflictos que enzarcen al Tribunal consigo mismo por vías mucho menos deslumbrantes. Supongamos que el Tribunal proyecte construir un anexo en una zona que los ecologistas desean conservar intacta. La cuestión llega a los tribunales, y el caso se amplifica y desmesura hasta convertirse en un *affaire* de altos vuelos que finalmente aterriza en el propio Tribunal Supremo. Como es obvio, la razón de que no puedan evitarse por completo situaciones semejantes es que todo tribunal está inmerso en un medio social, del que toma edificios, funcionarios, etcétera, y con el que establece contratos que obligan a las partes. Y como justamente el derecho estudia relaciones de este tipo, ningún tribunal, a ningún nivel, podrá garantizar que jamás se verá envuelto en problemas jurídicos.

Aunque es raro que el Tribunal Supremo llegue a enzarzarse consigo mismo, no es raro que así suceda en otros brazos del aparato estatal. Recientemente se presentó un caso curioso en San Francisco. Se habían producido gran número de quejas por los métodos utilizados por el departamento de policía, y por este motivo se nombró un comité de régimen interior, que, a puerta cerrada y reservadamente, debía examinar cuestiones como la brutalidad policial. Entonces, inevitablemente, se alzaron las voces de quienes decían que el comité de régimen interno estaba encubriendo y disimulando sus hallazgos; por este motivo, la alcaldesa, Dianne Feinstein, dispuso la formación de un segundo comité de actuación, doblemente reservada, encargado de inspeccionar el funcionamiento de la comisión de asuntos internos. La última noticia que tuve decía que el informe del segundo comité era desfavorable. Ignoro en qué acabó el asunto.

Asimismo, el procedimiento parlamentario puede suscitar las complicaciones más enrevesadas. Las *Robert's Rules of Order* llevan ya varias ediciones, y cada organismo tiene que elegir el sistema de reglas al que deberán ajustarse sus deliberaciones. La última edición del *Robert's* establece que de no elegirse específicamente una edición determinada, el procedimiento deberá ajustarse a la edición más reciente. De no elegirse precisamente la última edición puede plantearse un problema, porque no será entonces posible fundarse en su autoridad para decir que debemos fundarnos en la edición elegida.

El procedimiento parlamentario, que se propone esclarecer en qué orden deberán ir atendiéndose cuestiones que simultánea y competitivamente exigen atención, nos recuerda en ciertos aspectos los procedimientos a que deben ajustarse los grandes sistemas de proceso de datos para gestionar sus propios asuntos internos. Todos estos sistemas contienen siempre un programa, llamado sistema operativo, del que forma parte un subprograma –el algoritmo de planificación– que pondera la prioridad de cada una de las tareas pendientes de ejecución y decide cuál habrá de ser la siguiente inmediata. En los sistemas de multiproceso, esto significa determinar a qué actividad se asignará el "hueco temporal" siguiente, que puede durar desde un milisegundo hasta unos cuantos segundos, o tal vez ser ilimitado; ello depende de la prioridad conferida a la actividad y de otros muchos factores. El sistema admite también "interrupciones", que llegan e interfieren con –¡Vaya! Discúlpeme usted, llaman por teléfono. Enseguida vuelvo. Ya está. Lamento la molestia. Es que alguien quería colocarme un contestador automático. Ya me dirá usted para qué... ¡Aah...! ¡Aah...! ¡Atchís! –perdón–... quiero yo un chisme de esos. ¿Dónde estábamos? ¡Ah, sí! las interrupciones. En cierto modo vienen a ser como llamadas telefónicas que se nos llevan al dependiente, cosa que fastidia a más no poder, porque nosotros nos molestamos en ir en persona, mientras que quien llama por teléfono, más comodón, recibe atención prioritaria.

Un buen algoritmo de planificación se esfuerza por ser equitativo; empero pueden surgir conflictos de todas clases al producirse interrupciones de interrupciones previas que son a su vez interrumpidas. El algoritmo de planificación ha de ser capaz de hacer pasar sus programas, encargados de tomar las decisiones de régimen interno, con alta prioridad, pero no tan alta que el ordenador ya no pueda atender a ninguna otra cosa. En ocasiones, las prioridades internas y externas se enmarañan de tal modo que el sistema completo de proceso ha de comenzar por "desbrozar" (*thrash*). Este es el término empleado para describir situaciones donde el sistema operativo invierte todo su tiempo –o casi– empantanado en cálculos "a puerta cerrada", en decidir a qué se va a dedicar. Ni que decir tiene que durante los períodos de "desbroce" apenas si se llevan a cabo "auténticos" cálculos. La situación nos recuerda el estado cognoscitivo en que puede verse una persona cuando sobre ella pesan demasiados factores a tener en cuenta simultáneamente, y la más mínima reflexión acerca de cualquiera de ellos parece provocar una erupción de paradójicos dilemas y callejones sin salida.

Para bien o para mal, ni los tribunales ni los sistemas operativos pueden echar el cierre e irse a dormir. Los embrollos y conflictos en que se ven envueltos son muy reales, y es preciso idear algún procedimiento para salir adelante. Fueron consideraciones como éstas las que llevaron a Suber a inventar su enrevesado juego, el Nomic.

Me dice Suber cuánto le chocó siempre el cínico comentario de que "la política no es más que un juego". Ahora bien, una actividad fundamental del político en ejercicio es la acción legislativa. Así pues, si la política es un juego, sus jugadas consisten en modificar las leyes (las reglas del juego) o introducir otras nuevas. Además, para estructurar el proceso de cambio de las reglas se precisan algunas reglas más. Por otra parte, ningún sistema legal en vigor parece tener reglas que sean absolutamente inmunes a modificación por vía legal. El principal objetivo de Suber, según me decía, fue "construir un juego viable que proporcione un modelo de esta peculiar situación. Pero mientras que los gobiernos se ven en cada momento presionados para cambiar sus reglas por realidades históricas, por la ideología de sus pueblos y por las reglas ya existentes, yo quise que mi juego naciera con un sistema de reglas todo lo 'limpio' posible". El Nomic es un juego que cumple estos requisitos, y sus reglas, o mejor, su Sistema Inicial de reglas, se presenta un poco más adelante. Casi todo cuanto sigue es, en esencia, del propio Suber. Yo me he limitado a condimentarlo con algunas observaciones de mi cosecha.

En los sistemas jurídicos, las reglas por excelencia son las leyes aprobadas en las Cámaras. La elaboración de leyes se efectúa mediante un proceso reglamentado, que es en parte estatutario; por consiguiente, el poder de elaborar y modificar las leyes alcanza hasta algunas de las normas que regulan tal proceso. No obstante, casi todas las normas que gobiernan la elaboración de leyes son de rango constitucional, no estatutario, y por tanto, se en-

cuentran por encima del poder que ellas regulan. Por ejemplo, el Congreso puede modificar su reglamento y su estructuración en comisiones y grupos parlamentarios, puede comprometer sus acciones futuras a otras del pasado, pero (nos referimos al Congreso de los Estados Unidos) no puede alterar mediante meros estatutos el hecho de que haga falta una "supermayoría" de dos tercios para levantar un veto del Ejecutivo, ni puede abolir o circunvenir a una de sus cámaras, promover una ley de impuestos desde el Senado, o delegar en expertos una porción excesiva de su poder.

Si bien los estatutos no pueden afectar a las normas constitucionales, éstas sí pueden afectar a aquéllos. Vemos aquí una importante diferencia de prioridad lógica. Al producirse un conflicto entre normas de distinto rango, las constitucionales han de prevalecer siempre. Esta diferenciación de nivel lógico tiene concreción paralela en una jerarquización de orden político, a saber, que las normas de nivel lógico más elevado (las constitucionales) son más difíciles de enmendar que las estatutarias, lógicamente subordinadas.

La mayor dificultad para modificar las leyes de máximo rango no se debe al azar. Una de las razones de que ciertas normas sean más estables que otras es impedir que una breve ráfaga de fanatismo eche por tierra decenios, e incluso siglos, de progreso. Podríamos decir que se trata de un caso de auto-paternalismo: un sacrificio deliberado de los principios democráticos, pero un sacrificio pensado para proteger a la democracia, a modo de un seguro contra los momentos de desfallecimiento que prevemos. Tal propósito no podrá verse cumplido a menos que el sistema de división de poderes cree también una jerarquía lógica donde las reglas menos mudables tengan precedencia lógica sobre las más mudables; de lo contrario las leyes mudables podrían conculcar y destruir los principios, más profundos y abstractos, en que se funda todo el sistema. Hacen falta supermayorías y el concurso de varios organismos para proteger los fundamentos del sistema contra cambios apresurados; tal propósito protector quedaría sin efecto si los cimientos estuviesen al alcance de normas cuya promulgación exigiera tan sólo la mayoría simple de una legislatura.

Aunque todas las normas del sistema norteamericano son modificables, por conveniencia llamaremos normas permanentes o inmutables a los preceptos constitucionales, cuya enmienda es difícil, y mudables a las normas de inferior rango jurídico. Otro tanto se hace en el Nomic, donde, al menos inicialmente, no hay reglas absolutamente inmutables. Y para que el auto-paternalismo del Nomic sea eficaz, sus reglas "inmutables", además de resistencia a los cambios, han de tener prioridad en el orden lógico.

Hay muchos diseños capaces de lograr este requisito. En el Nomic se ha adoptado un sistema simple, de doble nivel, inspirado hasta cierto punto en la Constitución de los Estados Unidos. En teoría, el número de niveles normativos, y los correspondientes grados de dificultad que el sistema ofrezca para modificar sus reglas, puede ser arbitrario. Para las normas de clase *A*, por ejemplo, donde tal dificultad sería máxima, podría ser necesario el acuerdo unánime de un órgano central más el consentimiento, también unánime, de todos los órganos locales o regionales. Para las normas de clase *B* podrían exigirse supermayorías del 90 por ciento; para las de clase *C*, del 80 por ciento, y así sucesivamente. El número de tales categorías podría ser tan grande como se quisiera. Tanto así, que de establecerse las adecuadas tipificaciones para nuestros informales hábitos de etiqueta y trato social, podría argumentarse vigorosamente que la vida de sociedad es precisamente uno de estos sistemas de número indefinido de niveles. En las cercanías del extremo "difícil de modificar" de la serie de normas se encontrarían las leyes en sentido estricto, que en sentido ascendente irían desde precedentes judiciales, reglamentos y órdenes ministeriales, y continuarían por las leyes ordinarias y orgánicas, terminando en las disposiciones constitucionales. En el otro extremo, el más bajo de la escala, se encontrarían las reglas de conducta personal que cada individuo puede alterar a su albedrío sin incurrir en desaprobación o censura ajena. Un poco por encima de éstas se encuentran ya reglas cuya modificación conlleva un costo; costos cuyas primeras manifestaciones pueden ser ceños fruncidos o chasquear de lenguas y que pueden ascender al puñetazo de indignación cuando no al asesinato.

En cualquier caso, y para facilitar el aprendizaje y desarrollo del juego, el Nomic es un pulcro sistema de dos niveles, a diferencia del aparato legal norteamericano, que es un sistema muy matizado, con muchos niveles intermedios inferiores al estatutario; entre ellos tenemos los reglamentos parlamentarios y administrativos, las resoluciones conjuntas, los tratados, los acuerdos ejecutivos, las sentencias judiciales de altos y bajos tribunales, la legislación particular de cada estado, las normas procesales y de testificación, las órdenes del ejecutivo, las normas deontológicas profesionales, las presunciones probatorias, las reglas que determinan el orden jerárquico de las reglas, los cánones de interpretación, las normas contractuales, etcétera. No queremos decir con esto que en el Nomic sea imposible que se den niveles matizados e intermedios, debidos a compromisos tácitos o al hábito del juego. En efecto, este juego es de tal naturaleza que permite a los jugadores añadir nuevos niveles normativos si así lo acuerdan explícitamente, siéndoles más fácil añadírselos a una partida sencilla que suprimirlos en una complicada.

El sistema de dos niveles del Nomic incorpora algunos de los rasgos autopaternalistas de la Constitución Federal. Las reglas "inmutables" gobiernan procesos más fundamentales que las "mudables", y de esta forma tales procesos quedan resguardados de enmiendas apresuradas. Puesto que durante el desarrollo del juego el núcleo central puede cambiar (y en sus puntos de menos importancia *tiene* que cambiar), tras unas cuantas rondas el juego puede en cierto sentido ser distinto del que se empezó. De todas formas, todo cuanto resultare de conformidad con las reglas será un juego de Nomic. El "sabor" del juego puede variar radicalmente de una partida a otra, aunque a nivel más profundo el juego se conserve sustancialmente idéntico.

De forma parecida, los humanos experimentamos constante desarrollo y modificación, y no obstante seguimos convencidos de que tiene sentido referirse –y así lo declaramos al decir "yo"– a una entidad estable subyacente. Los rasgos más directamente perceptibles cambian, mientras el carácter más profundo y oculto permanece. Y sin embargo, desde el nacimiento hasta la muerte, pasando por la madurez, los cambios pueden ser tan radicales que a veces nos parece sentir como si en una sola vida uno hubiese sido en realidad varias personas. Análogamente, en derecho, muchos han reconocido que si una cláusula define cómo enmendar una constitución, aunque sólo consienta enmiendas graduales, su repetida aplicación puede engendrar constituciones fundamentales nuevas.

Siendo el Nomic un juego de más de un nivel, el fundamento lógico del juego –el núcleo central– no puede ser radicalmente modificado en unas cuantas jugadas. Semejante estabilidad es una virtud tanto en los juegos como en los sistemas políticos; empero, los jugadores del Nomic tienen sobre los ciudada-

nos la ventaja de poder, si se sienten motivados a ello, ajustar con bastante rapidez tanto el grado de continuidad como el ritmo de cambio, valiéndose de su ingenio, mientras que en la vida real los mecanismos que permiten llevar a efecto tales cambios se conocen sólo superficialmente, y están en gran medida más allá de nuestro alcance.

Los juegos ordinarios tienen la estabilidad que les otorga la fijeza de sus reglas o, al menos, de reglas que sólo cambian de una partida a otra, y no durante el desarrollo de una de ellas. La estabilidad del Nomic recuerda más la de un sistema jurídico que la de un juego ordinario; se trata de un conjunto de sistemas, directivas y procesos que están constantemente experimentando cambios sometidos a reglas. Sin embargo, si se desea señalar hacia una entidad específica para denominarla "Nomic propiamente dicho", el Sistema Inicial de reglas presentado más adelante sirve a tal fin. No obstante, el Nomic es también el resultado, en cualquier instante dado, del cambio dinámico y reglamentado que sufra el Sistema Inicial. La identidad permanente del Nomic, lo mismo que la de una nación o una persona, se debe al hecho (si es que es un hecho) de que todo cambio ha de ser producto de reglas preexistentes válidamente aplicadas, y de que ningún cambio es "revolucionario". (Se podría admitir incluso que el cambio revolucionario no es sino otro tanto de lo mismo: en las revoluciones, reglas que se habían considerado como inmutables por siempre quedan convertidas en mutables por otras reglas más profundamente inmutables que se habían dado por sentadas, y que por eso eran invisibles, o sea, tácitas.)

En su Regla 212, el Nomic *prevé* la posibilidad de dictar sentencia (como hacen los tribunales), y no tan sólo para imitar en otro aspecto más el aparato estatal, sino precisamente por las mismas razones que obligan a los estados a crear sistemas de justicia; inevitablemente se establecerán reglas ambiguas, incoherentes o incompletas, o que requieren aplicarse a circunstancias personales. El "juego" no puede interrumpirse; por tanto, algún organismo ha de recibir la potestad de dictaminar definitivamente y con autoridad, de forma que pueda proseguir el juego.

En el Nomic, las sentencias no quedan sometidas a posibles precedentes, porque ello obligaría a llevar en cada partida una abrumadora tarea de registro y archivo. De todas formas, el principio de *stare decisis* (a saber, que es preciso atender a los precedentes) puede ser impuesto por así acordarlo los jugadores, e incluso puede surgir sin ser explícitamente enunciado de sentirse varios jueces sucesivos impelidos a tratar "con el mismo rasero" a personas "en situación análoga". (Es preciso reconocer que el significado de estos términos en casos concretos puede muy bien requerir sentencias de nivel superior. Nos las habemos aquí con una de las más peligrosas fuentes de recurrencia infinita que potencialmente pueden surgir de casos judiciales de la vida real.) De no disponer de *stare decisis* los jugadores están constreñidos a redactar cuidadosamente sus reglas, hacer adjudicaciones bien reflexionadas, declarar inválidas sentencias mal fundadas o enmendar normas defectuosas. Es ésta una de las formas en que el Nomic nos enseña los principios y requisitos básicos del derecho, no obstante simplificar enormemente los problemas que plantea.

El Sistema Inicial debe ser lo bastante breve y sencillo como para incitarnos a jugar y, por otra parte, lo bastante amplio y complejo como para tener previstas las contingencias que verosímilmente puedan surgir antes de que los jugadores consigan preverlas creando reglas por sí mismos y, también, para evitar que el cambio de una sola regla pueda poner en peligro la continuidad del juego.

Una contingencia que deliberadamente queda a discreción de los jugadores es resolver qué debe hacerse en los casos de infracción de reglas. Los jugadores deben decidir si las infracciones antiguas pueden quedar protegidas por un estatuto de prescripción o caducidad, o si pueden todavía ser penalizadas o invalidadas en sus efectos. La mejor manera de averiguar si la mutua tolerancia y el poder discrecional del juez bastarán para salir del paso en situaciones de crisis de confianza, o para aplazarlas hasta que se pueda establecer una norma al respecto, o de saber si el Sistema Inicial consigue equilibrar satisfactoriamente las pretensiones contradictorias de sencillez y complejidad en las partidas es, precisamente, jugar unas cuantas.

En Nomic es posible darle un giro muy curioso a una propiedad común y fundamental de los juegos, a saber, permite desdibujar la distinción entre las reglas que los definen y las reglas de buen juego, de habilidad táctica, es decir, la diferencia entre las normas que definen jugadas lícitas y las reglas para jugar con destreza. O dicho todavía de otra forma, en el Nomic se desdibuja la distinción entre lo permitido y lo óptimo.

Hay pocos juegos que se extiendan también a los intervalos entre las partidas, y que, de parecer abarcarlos, no se conviertan en paradójicos. Vale la pena notar, sin embargo, que los niños sí suelen inventar juegos que establecen penalizaciones por negarse a jugar, o que extienden la jurisdicción del juego a la totalidad de la "vida real", acabando solamente cuando los niños se cansan o se olvidan de que están jugando, ("¡Papá, papá! ¡Ven a jugar a este juego que hemos inventado!" "No puedo, amor mío, estoy leyendo." "¡Pues pierdes 10 puntos!") En el Nomic, esta idea se lleva a sus últimas consecuencias. Las partidas de Nomic pueden abarcar cualquier cosa si así lo acuerdan los jugadores. La separación entre los intervalos de juego y los intervalos de pausa o descanso puede desplazarse en cada turno, e incluso puede quedar aparentemente eliminada. Los jugadores pueden estar gobernados por el juego incluso cuando crean hallarse entre partidas o haberlo abandonado.

Casi todos los juegos disponen de procedimientos infalibles para decidir si una jugada es o no lícita. Por el contrario, en el Nomic es fácil que se presenten situaciones donde cueste determinar la legalidad o ilegalidad de las jugadas. Además, en el Nomic pueden surgir situaciones paradójicas capaces de impedir al juez emitir juicios. En ocasiones podrán deberse a la deficiente redacción de algunas reglas, pero las paradojas pueden deberse también a reglas inambiguas y maliciosas. Es verdaderamente imposible prever la diversidad de posibles paradojas. De todas formas, la Regla 213 está ideada con la intención de resolverlas lo mejor posible sin recargar al Sistema Inicial con excesivos requisitos y excepciones legislativas. Observemos también que la Regla 213 permite a los jugadores ingeniosos crear paradojas, hacerlas aprobar (si es que la propuesta de norma les parece a los otros jugadores suficientemente inocua) y, seguidamente, ganar la partida.

Y basta ya de preámbulo general al juego. Podemos ahora pasar a describir cómo se juega una partida de Nomic. El Nomic, volvemos a insistir, es un juego donde cada jugada consiste en cambiar alguna regla o reglas. Bastan para él dos jugadores, pero las partidas resultan más interesantes con tres o más. La clave del juego está en la Regla 202, que debe ser leída la primera. Los jugadores necesitan lápiz y papel y (al menos al comenzar) un dado. En lugar de hojas de papel, tal vez sea preferible usar fichas. Es necesario escribir todas

las reglas nuevas, y también todas las enmiendas a las anteriores. La situación de las normas en el papel, o su posición sobre la mesa, puede servir para indicar cuáles son "inmutables" y cuáles "mudables". Las enmiendas pueden situarse encima, o al lado, de las normas por ellas modificadas. Las reglas derogadas pueden eliminarse, sin más. En cambio, para partidas más complejas, los jugadores quizá prefieran transcribir en sus cuadernos el texto de cada nueva regla o de cada enmienda, y llevar una lista numerada aparte con las reglas todavía vigentes. Idealmente, quizá lo mejor fuera registrar todas las normas en la memoria de un ordenador y sentar a cada jugador frente a un terminal. Las enmiendas podrían entonces incorporarse instantáneamente, corrigiéndose su orden numérico.

SISTEMA INICIAL DE REGLAS

Reglas inmutables

101. Todos los jugadores han de cumplir siempre todas las reglas que en cada instante estén vigentes. Las reglas del Sistema Inicial están en vigor siempre que comienza una partida. El Sistema Inicial está formado por las Reglas 101-116 (inmutables) y las 201-213 (mudables).

102. Inicialmente, las reglas de la serie 100 son inmutables y, mutables, las reglas de la serie 200. Las reglas que subsiguientemente entren en vigor o sean transmutadas (es decir, transformadas de mutables en permanentes o viceversa) pueden ser mutables o inmutables independientemente de su numeración. Las reglas del Sistema Inicial pueden ser transmutadas con independencia de su numeración.

103. Cambiar una regla consiste en cualquiera de estas cosas: (1) la puesta en vigor, la revocación o la enmienda de una regla mudable; (2) la puesta en vigor, la revocación o la enmienda de una enmienda; o (3) la transmutación de una regla inmutable en mudable, o viceversa. (Nota: Esta definición implica que, al menos inicialmente, todas las nuevas reglas sean mudables. Las reglas inmutables, en tanto permanezcan tales, no pueden ser enmendadas ni derogadas; las reglas mutables, en tanto se mantengan mudables, sí pueden ser enmendadas o derogadas. Ninguna regla es, pues, absolutamente inmune a cambios.)

104. Todos los cambios de reglas propuestos por vía adecuada han de someterse a votación. Los cambios propuestos quedarán adoptados si y solamente si reciben el número de votos exigido.

105. Todo jugador es votante, elector y elegible. Todo votante elegible ha de participar en todas las votaciones relativas a cambio de reglas.

106. Todas las propuestas de modificación de reglas han de consignarse por escrito antes de someterlas a votación. De llegar a aprobarse, su aplicación al juego se hará en la misma forma con que se aprobaron.

107. Ningún cambio de reglas puede entrar en vigor con anterioridad al momento de completarse la votación que lo adoptó, ni siquiera en el caso de que su redacción así lo formulase explícitamente. Ningún cambio de reglas puede tener efectos retroactivos.

108. A cada propuesta de modificación tiene que asignársele un número de orden jerárquico (un número ordinal); las referencias a ella se harán citando tal número. Los números de orden han de empezar por 301; a cada cambio propuesto por vía adecuada tiene que asignársele el entero consecutivo, tanto si la proposición es adoptada como si no.

Cuando una regla sea revocada y luego vuelta a poner en vigor, habrá de recibir el mismo número ordinal que la proposición para restaurarla. Cuando una regla se enmiende o transmute recibirá el número ordinal de la proposición correspondiente. Cuando una enmienda, a su vez, se enmiende o revoque, la regla entera de la que forma parte recibirá el número ordinal de la proposición de enmienda o derogación de la enmienda.

109. Los cambios que propongan transmutar reglas inmutables en mudables podrán adoptarse si y solamente si el voto es unánime entre los votantes elegibles.

110. Las reglas mudables que por cualquier motivo sean incompatibles con alguna regla inmutable (que sólo puedan hacerse compatibles con ella transmutando la regla inmutable en mudable) son nulas de pleno derecho y quedan sin efecto. Tales reglas no transmutan implícitamente las reglas inmutables en mudables, enmendándolas al mismo tiempo. Los cambios de normativa que transmuten en mudable alguna regla inmutable serán efectivas si y solamente si enuncian explícitamente su efecto transmutador.

111. Si, con la redacción en que se propone, un cambio de reglas resulta confuso, ambiguo, paradójico o tendente a destruir el juego; si algún jugador sostiene que tal cambio es resultado de componer dos o más cambios de reglas, o afirma que la enmienda propuesta no introduce novedades, o si de alguna otra forma se pone su valor en tela de juicio, los otros jugadores tienen derecho a sugerir enmiendas, o aducir razones en contra del cambio propuesto antes de que se vote al respecto. No obstante, habrá de ser el proponente quien decida la versión definitiva en que la propuesta será sometida a votación, y es también el proponente quien decide en qué momento cerrar el debate y efectuar el voto.

112. El estado de cosas que constituye victoria no puede ser alterado por adjudicación de n puntos a algún otro estado de cosas. El valor de n y los medios lícitos de lograr puntos sí pueden, empero, alterarse. Pueden ponerse en vigor reglas que definan quién gana la partida cuando el juego no pueda continuar, y (si estas reglas son mutables) también enmendarse o derogarse.

113. Los jugadores mantienen siempre la opción de dar la partida por perdida para no tener que continuar en el juego o incurrir en penalización. (En el fallo del juicio del jugador que incurra en falta no podrá imponerse pena mayor que la pérdida de la partida.)

114. Ha de haber siempre una regla mudable, cuando menos. Jamás debe llegarse a impedir totalmente la posibilidad de introducir cambios en las reglas.

115. Los cambios que afecten de cualquier forma a las reglas precisas para consentir o aplicar cambios de reglas son tan plenamente permisibles como los restantes cambios de normativa. Son incluso permisibles cambios que revoquen en todo o en parte su propia autoridad. Ningún cambio de normativa o jugada de cualquier tipo puede o podrá prohibirse con el solo fundamento de que es auto-alusivo, o de que es aplicable a sí mismo.

116. La adopción de cambios de reglas solamente es permisible cuando una regla o conjunto de reglas lo hagan permisibles. En los restantes casos, todo cuanto no se encuentre explícitamente prohibido o regulado por alguna norma está permitido, y no está reglamentado (en oposición a la máxima "Todo está prohibido, salvo lo que está expresamente permitido").

Reglas mudables

201. Los jugadores han de actuar por turnos, que irán rotando en sentido horario. Cada uno debe consumir su turno completo. No está permitido pasar o correr el turno; tampoco pueden omitirse partes de su turno. Todos los jugadores comienzan con cero puntos.

202. Cada turno consta de dos partes, que deben ejecutarse en este mismo orden: (1) Proposición de un cambio de las reglas, con votación de la

propuesta y (2) lanzamiento de un dado, sumándose el número de puntos que el dado señala a la puntuación del jugador de turno.

203. Los cambios de reglas tienen por condición necesaria y suficiente para ser adoptados que todos los votantes elegibles voten por unanimidad a favor.

204. Si la Regla Inicial 203 se enmienda o revoca, entonces, cada vez que se adopten sin unanimidad cambios de reglas, los jugadores que voten en contra de esos cambios recibirán 20 puntos cada uno.

205. Los cambios de reglas que resulten adoptados entrarán en vigor tan pronto quede concluida la votación que decide su adopción.

206. Cuando, por votación, se rechace una propuesta, el jugador que la haya presentado perderá 10 puntos.

207. Cada jugador dispone exactamente de un voto.

208. Será ganador de la partida el primer jugador que alcance 100 puntos (positivos).

209. En ningún momento podrá haber más de 25 reglas mudables.

210. Los jugadores no pueden conspirar ni consultarse entre sí acerca de futuros cambios de reglas, salvo que sean compañeros de equipo.

211. Si dos o más reglas mudables entrasen en conflicto, o si dos o más reglas inmutables entran en conflicto, se asignará primacía a la que lleve número ordinal más bajo.

Cuando al menos una de las reglas en conflicto declara explícitamente acerca de sí misma ceder la prioridad a otra regla (o a otro tipo de regla), o tener precedencia sobre otra regla (o tipo de regla) tales disposiciones invalidan el método numérico de establecimiento de la prioridad.

Si dos o más reglas declaran tener precedencia la una sobre la otra, o declinarla en favor de la otra, volverá a entrar en vigor el procedimiento numérico para establecer la precedencia.

212. Si los jugadores no están de acuerdo acerca de la legalidad de una jugada, o acerca de la interpretación o aplicación de una regla, el jugador situado inmediatamente a la derecha del jugador de turno entrará en funciones de juez, y dirimirá la cuestión. (Tal proceso se llamará solicitud de fallo, o arbitraje.)El fallo del juez sólo podrá revocarse por voto unánime de los demás jugadores, debiendo efectuarse la votación antes de que el turno pase al jugador siguiente. Cuando se solicita el arbitraje, el jugador siguiente no puede comenzar su turno sin previo consentimiento de la mayoría de jugadores. Cuando se revoca el fallo de un juez, el jugador situado a su derecha se convierte en juez de turno para la cuestión, y así sucesivamente, con la salvedad de que ningún jugador podrá ser juez durante su turno ni durante el turno de un compañero de equipo. A menos que alguno de sus fallos quede invalidado, será un solo juez quien resuelva todos los conflictos que el juego pueda plantear hasta que dé comienzo el siguiente turno, incluidos los que pongan en cuestión la propia legitimidad o la jurisdicción del juez mismo. Los jueces nuevos no están obligados por decisiones de jueces precedentes. Por otra parte, los nuevos jueces solamente pueden entrar en los conflictos y desacuerdos que en ese momento enfrenten a los jugadores y que afecten a la terminación del turno en que su fallo fue solicitado. Para lo dispuesto en esta regla, basta la insistencia de un solo jugador para crear el desacuerdo.

213. Si las reglas se modifican de modo tal que sea imposible continuar el juego, o si es imposible decidir definitivamente la legalidad de una jugada, o si por un razonamiento de calidad del juez, no revocado, una misma jugada parece ser legal e ilegal simultáneamente, entonces el primer jugador que se encuentre impedido para completar su turno será vencedor de la partida.

Esta regla tiene primacía sobre cualquier otra regla para designar al vencedor.

He ahí las reglas del Nomic. Tras leerlas, un amigo mío comentó "Nunca llegará a desplazar al Monopoly". Estoy seguro de ello, y también de que este juego es para los espectadores mucho más interesante de observar que el Monopoly. Para que los mirones encuentren el juego aún más intrigante, Suber, que ha jugado muchas veces a este juego de aspecto absurdo, ha ofrecido una amplia gama de sugerencias de interesantes cambios de normativa:

Hacer que las reglas mudables sean más fáciles de enmendar que las inmutables, derogando la exigencia de unanimidad de la Regla Inicial 203, sustituyéndola por otra que estipule, pongamos por caso, una mayoría simple. Añadir al juego nuevos niveles por arriba, por abajo, o intermedios entre los dos iniciales. Se puede hacer que ciertas reglas solamente puedan enmendarse por procedimientos especiales (lo que podríamos llamar "atrincheramiento incompleto"). Idear reglas con caducidad, es decir, que expiren automáticamente al cabo de cierto número de turnos. Consentir que los jugadores se consulten entre sí acerca de futuros cambios de reglas ("pactismo"). Consentir votaciones secretas. Permitir "asambleas constituyentes" (o "revoluciones") gracias a las cuales todas las reglas sean más fácil y conjuntamente modificables por procedimientos nuevos de validez temporal. Imponer un límite al número máximo de reglas inicialmente inmutables que en cualquier momento puedan ser modificadas o revocadas.

Consentir que los números ordinales de las reglas cambien en ciertas contingencias, alterando por tanto sus prioridades. O modificar el sistema mismo de establecer tal precedencia, por ejemplo, haciendo que sean las reglas más recientes quienes tengan prioridad sobre las antiguas. (En la mayoría de los sistemas legislativos reales las reglas de prioridad favorecen la normativa más reciente.)

Transformar el sistema de adquisición de puntos, basándolo no en el azar sino en la habilidad (intelectual o deportiva). Aplicar una fórmula aritmética a la puntuación señalada por el dado, con el fin de que aumente el número de puntos concedidos a los jugadores cuyas propuestas sean desechadas, o cuyos fallos arbitrales sean revocados, y que haga en cambio decrecer el número de puntos de los jugadores que voten negativamente, o a quienes propongan enmiendas de más de cincuenta palabras, o se tomen más de dos minutos para proponer un cambio de reglas, o propongan transformar en mudable una regla inmutable, o propongan una norma que llegue a entrar en vigor pero más tarde se derogue.

Introducir un segundo o tercer objetivo, por ejemplo, un objetivo cooperativo que sirva de complemento al objetivo competitivo de acumular más puntos. Así, cada jugador podría aportar, llegado su turno, una letra a una frase en gestación, un verso a un poema compuesto colectivamente, un bloque a un castillo en construcción, etcétera, intentando el grupo dejar terminada la tarea común antes de que alguno de ellos sume el número de puntos requerido para ganar. Se puede también crear un segundo objetivo competitivo, como hacer que cada jugador efectúe una tirada en otro juego, de forma que el vencedor o vencedores del juego que primero terminen adquieran una ventaja predeterminada en el todavía pendiente. O también, haciendo que algún aspecto del juego esté condicionado por el resultado de algún otro juego diferente, con lo que cualquier otro juego o actividad que lograse reunir suficientes votos pasaría a formar parte del Nomic. De la misma forma, podemos dejar al Nomic en estado puro, y aña-

dirle premios, o dramatizarlo (por ejemplo, mediante psicodrama).

Se puede instaurar el juego por equipos. Se puede exigir la formación de equipos permanentes, o se puede permitir que se formen alianzas provisionales por diversos procedimientos (negociación informal, o una fórmula matemática que se aplice a las puntuaciones, o por rotación sistemática de los asociados). Se pueden crear "socios secretos". (Por ejemplo, los puntos que un jugador gana en su turno se suman también al tanteo de otro jugador, o se reparten con otro, que puede seleccionarse por algún mecanismo.)

Puede enriquecerse la capacidad del juego para remedar el proceso legislativo inventando un "índice de popularidad" que suba o baje con los acontecimientos del juego y exprese la "presión del electorado" o su "satisfacción". El índice puede usarse para restringir las jugadas permisibles (por ejemplo, mediante un sistema de premios y castigos). Se puede dejar cierto número de turnos entre la propuesta y la votación de la propuesta, dando así ocasión a los jugadores de ver qué otras propuestas pueden adoptarse en lugar de la suya.

El reto definitivo que Suber lanza a los lectores es éste: esclarecer si puede conseguirse que alguna regla sea genuinamente inmutable disponiendo al mismo tiempo de cierta capacidad de modificación de las reglas, y si la capacidad de cambiar las reglas puede ser irrevocable y totalmente derogada.

La riqueza del universo del Nomic ha sido ya abundantemente comentada. Desde luego, logra satisfacer todas las esperanzas que yo pudiera sentir cuando escribí acerca de juegos automodificantes en mi libro *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*. Mi intención allí era dar descripciones abstractas de tales juegos, sin llegar a imaginar que nadie pudiera elaborar tan concreta y ampliamente un juego de semejantes características. Durante mucho tiempo soñé con idear un sistema capaz de modificar en cierto sentido cada uno de sus propios rasgos, de forma que incluso si tuviera lo que yo llamaba niveles inviolados (equivalentes a grandes rasgos a las normas "inmutables" de Suber) también éstos pudieran modificarse.

Recuerdo vívidamente cómo me llegó tal sueño. Estaba yo en el último año de secundaria cuando por primera vez oí hablar de ordenadores al fallecido George E. Forsythe, quien por entonces era profesor de matemáticas en Stanford. (En aquella época no existían cosas como departamentos de ciencias de cómputo.) En la charla que dio a nuestra clase de matemáticas, Forsythe hizo hincapié en dos ideas. Una, que el propósito de los ordenadores era llevar a cabo cualesquiera cosas que a las personas se les ocurriera cómo ejecutar mecánicamente. Por tanto, hizo observar, los ordenadores irían inexorablemente abriéndose camino en un dominio nuevo tras otro, conforme fuéramos dándonos cuenta de que actividades que parecían requerir ideas nuevas, imaginación e incluso fantasía, podían reemplazarse por conjuntos de reglas muy ingeniosas y sutilmente concebidos, cuya ejecución se realizaría a la velocidad de la luz. Para mí, una de las más asombrosas ilustraciones con que Forsythe acompañó esta idea fue su explicación de cómo los ordenadores habían sido aplicados a sí mismos, concretamente con los compiladores, que son programas ideados para traducir programas redactados en lenguajes elegantes y legibles por humanos en las crípticas sucesiones de 1 y 0 del lenguaje de máquina.

La otra idea que Forsythe subrayó –íntimamente ligada a la anterior– es que los programas son, sencillamente, objetos asentados dentro de la memoria del ordenador y que, como tales, están tan sometidos a manipulación por otros programas (¡e incluso por sí mismos!) como puedan estarlo los meros números. (Fue la fusión de estas dos nociones lo que me inspiró la ambición de diseñar un ordenador abstracto. Jugando con los nombres de los ENIAC, ILLIAC, JOHNNIAC, y otros de los que había oído hablar decidí bautizarlo IACIAC.) Tenía yo la esperanza de que IACIAC no sólo pudiera manipular sus propios programas, sino incluso rediseñarse a sí mismo, cambiar las formas de interpretar sus propias instrucciones, etcétera. Pronto tropecé con dificultades, y no pude terminar mi proyecto; tampoco he podido olvidar la fascinación que tal idea me produjo. A mí me parece que, aunque el Nomic es un juego y no un ordenador, su espíritu se acerca más a la meta que yo ansiaba que cualquiera de las cosas que he encontrado hasta ahora. Es decir, a excepción suya.

ERRATUM

Número 70, julio de 1982

En la página 115, primera columna, línea 41, se atribuye al Sol un diámetro de 1500 millones de kilómetros. Debe leerse 1,5 millones de kilómetros.

Taller y laboratorio

Una pieza fundamental de la danza rítmica es la cinética

Jearl Walker

En el ballet se armoniza la belleza con la cinética, o parte de la física que se ocupa del estudio del movimiento. Alguien interesado en los dos ingredientes de esa mezcla es Kenneth Laws, profesor de física en el Dickinson College y alumno de danza del Central Pennsylvania Youth Ballet. Gran parte del estudio que sigue acerca de algunas actitudes y movimientos de danza se basa en información que él me ha facilitado.

Una parcela sustancial del primer aprendizaje de toda alumna (o, por supuesto, alumno) de ballet se orienta a entrenarla para que mantenga el equilibrio a la vez que ejecuta grácilmente los pasos y movimientos de danza. La bailarina estará en equilibrio siempre que mantenga su cuerpo descansando sobre una superficie de apoyo convenientemente situada bajo el mismo. Si esa superficie se corre hacia un lado, la atracción gravitatoria la derribará al suelo.

La gravedad, ya lo sabemos, atrae continuamente a todas y cada una de las porciones de su cuerpo, pero gracias al concepto de centro de masa la cuestión se simplifica bastante. El centro de masa es un punto definido matemáticamente, cuya posición depende de la manera en que está distribuida la masa del cuerpo, de tal modo que puede admitirse que sobre él actúa la resultante de la atracción que se ejerce sobre cada una de las infinitas porciones de que consta el cuerpo.

Cuando dicho punto no se encuentre por encima de la superficie del suelo en que se apoye la bailarina, la atracción gravitatoria creará sobre ella un momento de giro. Un momento de giro es el producto de una fuerza (el peso de la bailarina, en este caso) por una distancia llamada brazo de palanca. En la ilustración de esta página, que representa una figura humana inclinada, se indican ambas magnitudes. A causa de la inclinación aparece un momento de giro que tiende a rotar el cuerpo en torno a los pies y en dirección al suelo. Cuanto mayor sea la inclinación, tanto mayor será el brazo de palanca y, por tanto, el momento de giro. Pero si la bailarina se mantiene vertical, la longitud del brazo de palanca será nula y el peso no creará momento de giro alguno; así, esa postura será estable.

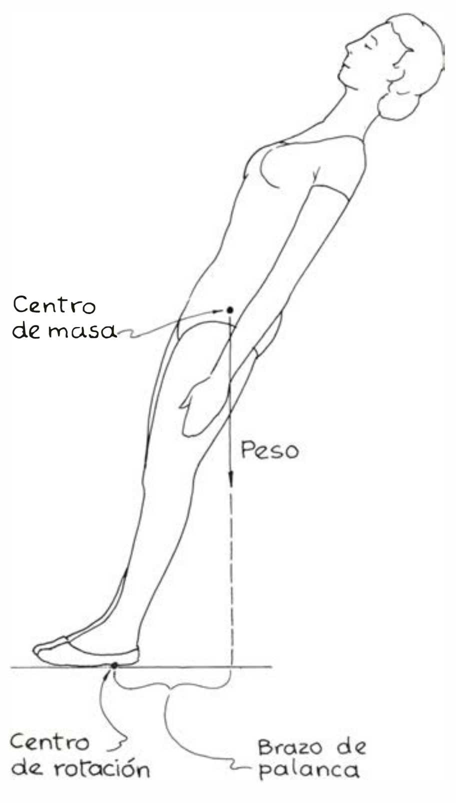
En la rutina que sigue toda principiante se trata de que desarrolle poco a poco el sentido del equilibrio. Por ejemplo, se la hace comenzar por una primera versión simplificada de la figura llamada *arabesque* para progresar, después, hacia el primer *arabesque penchée*. En la versión simplificada (*arabesque à terre*), la bailarina adelanta la pierna derecha y atrasa la izquierda, con la que toca el suelo de puntas; por consiguiente, su peso descansa sobre la pierna derecha. El brazo derecho está extendido hacia adelante, el izquierdo ligeramente hacia atrás.

Al mover la pierna izquierda hacia atrás, el centro de masa se corre en la misma dirección y, sin un movimiento compensador, la bailarina se caería hacia atrás. Entonces, para devolver el centro de masa a su posición sobre la superficie de apoyo, debe inclinarse hacia adelante y extender el brazo derecho. Este movimiento tiene un doble fin: es grácil y le permite mantener el equilibrio.

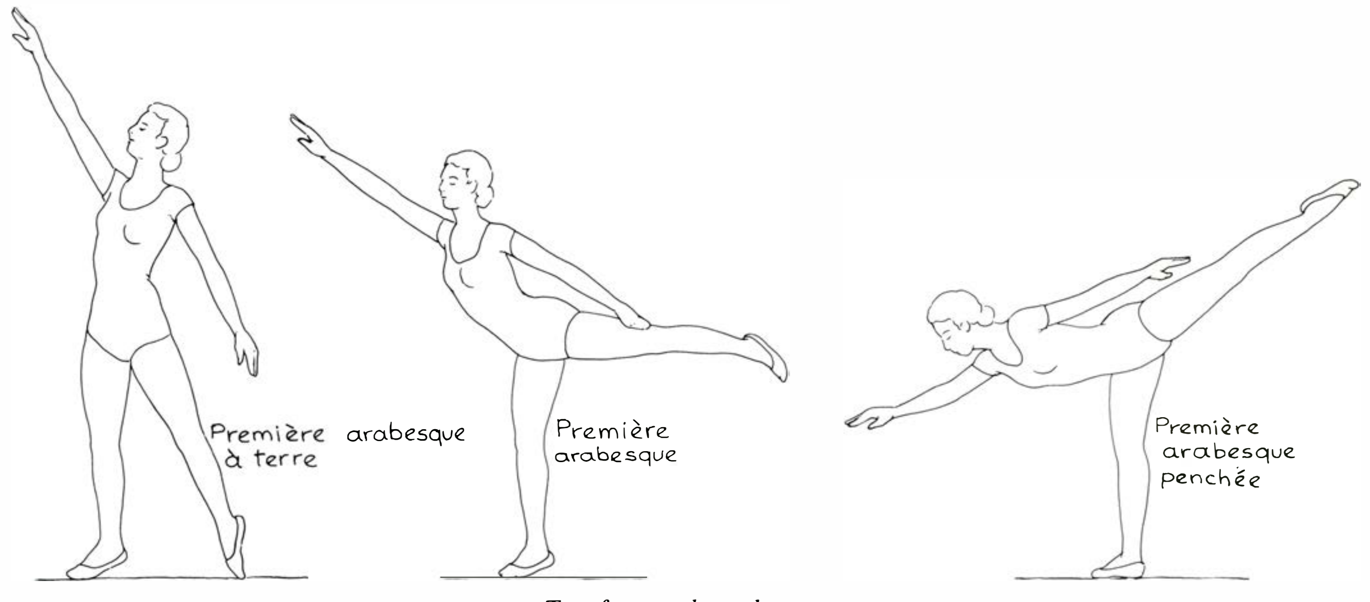
En el primer *arabesque allongée* la bailarina prosigue el movimiento hasta poner casi horizontales el torso y brazo derecho y la pierna retrasada se dobla hacia arriba. En el primer *arabesque penchée* dobla hacia abajo el torso y brazo derecho y hacia arriba la pierna retrasada unos 45 grados o más. En ambas versiones de la postura la masa desplazada hacia atrás debe ser igual a la desplazada hacia adelante, merced a la inclinación del torso y la extensión del brazo, pues sólo así permanecerá el centro de masa por encima de la superficie de apoyo y la bailarina estará en posición estable.

Parte de la fascinación que provoca el ballet proviene de la ilusión de que, a veces, las leyes físicas parecen interrumpirse momentáneamente. Un ejemplo de ello nos lo proporciona el *grand jeté*, que es un salto hacia adelante. Según Laws, un *grand jeté* ejecutado correctamente insinúa que la atracción gravitatoria sobre la bailarina se debilita algo cuando se acerca a la cumbre del salto.

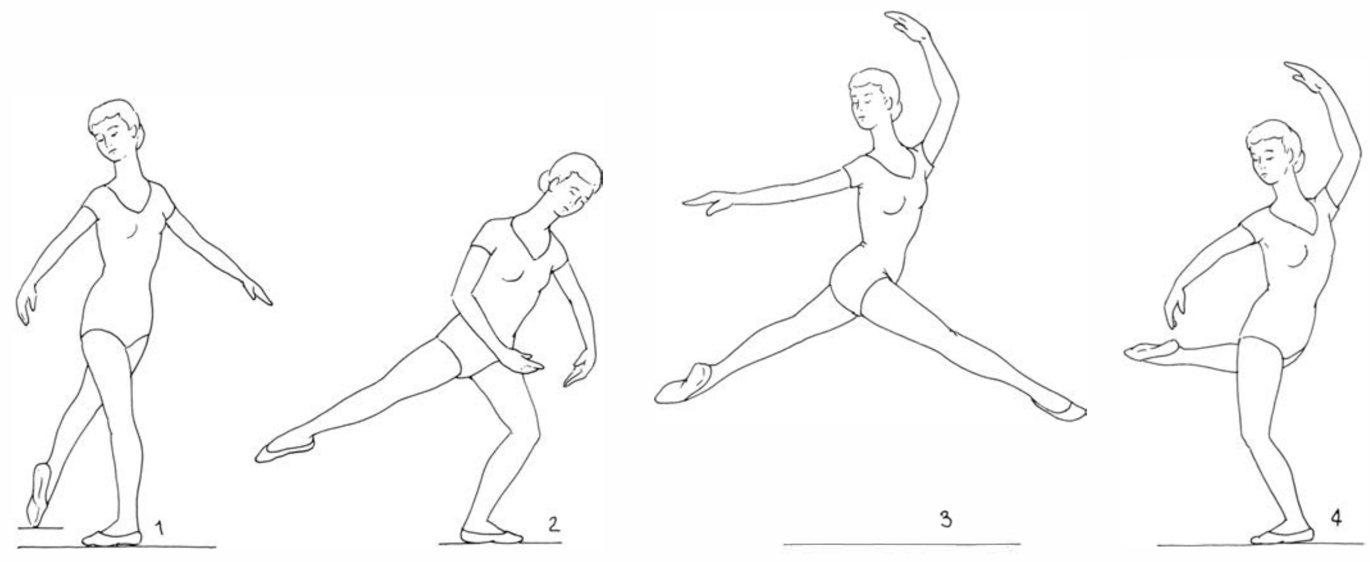
A esta ilusión contribuyen dos factores. Primeramente, ocurre desde luego que hay una cierta deceleración en la proximidad del punto más alto, incluso en un salto ordinario, a causa de las leyes que rigen el movimiento. Y, aunque la velocidad horizontal de la danzarina no varía durante el salto, su velocidad vertical es nula en la cumbre, de modo que inmediatamente antes y después de ésta su movimiento vertical es lento. Resultado de ello es que, alrededor de la mitad del tiempo que dura el salto completo, se encontrará a menos de un cuarto de la altura máxima.



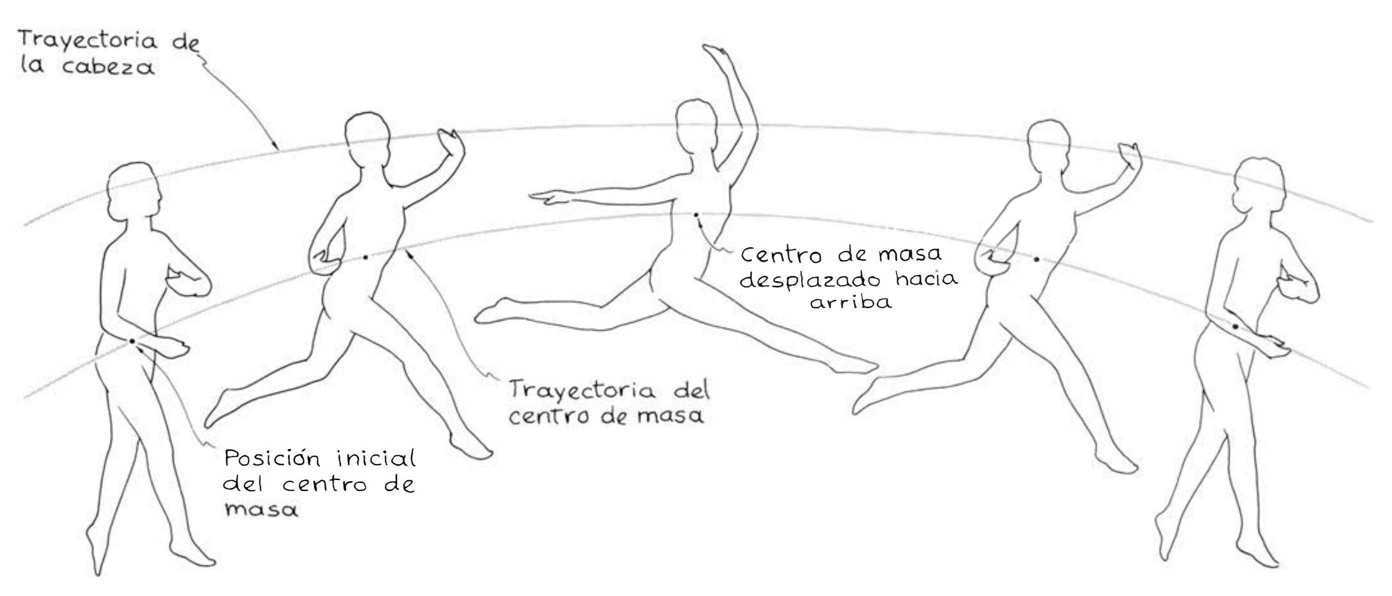
Acción de la gravedad



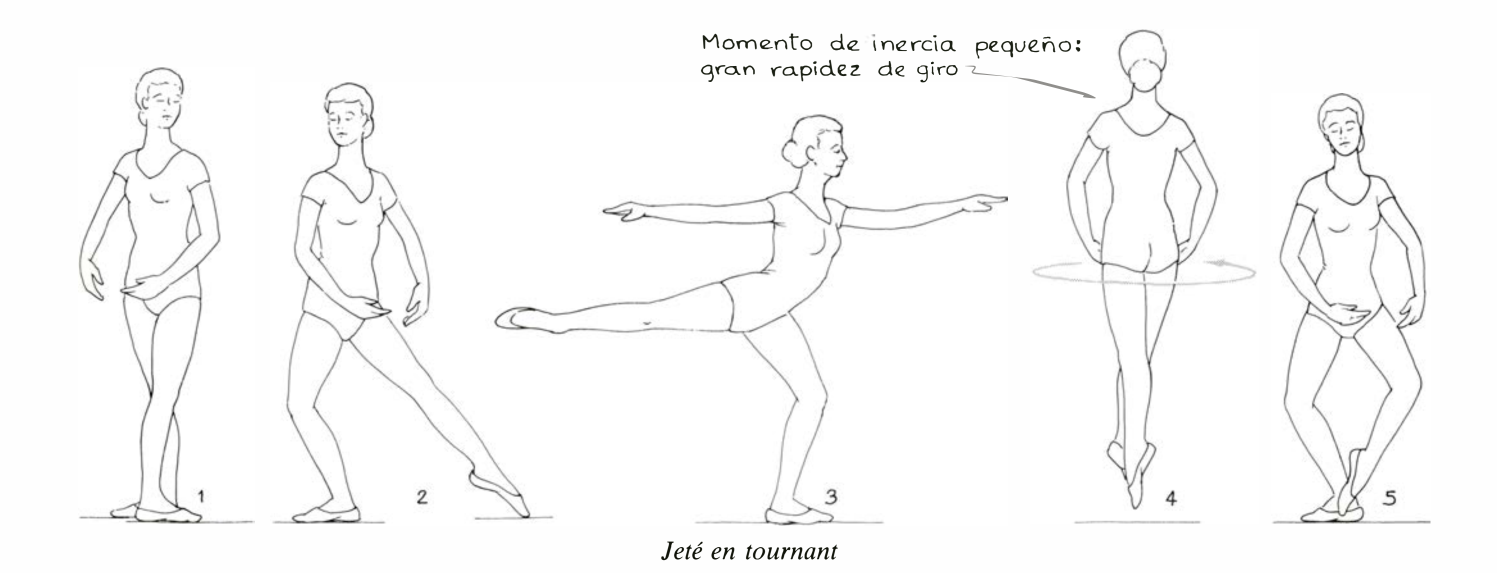
Tres formas de arabesque



Grand jeté



Corrimiento del centro de masa de la bailarina durante un grand jeté



Jeté en tournant

En un *grand jeté* hay otro elemento que contribuye a reforzar la ilusión de que la bailarina se queda suspendida en el aire en los alrededores de la cumbre. Gracias a cierto movimiento de sus brazos y piernas, mientras vuela, su trayectoria parece aplanarse en la cumbre. La ilusión depende de un desplazamiento de su centro de masa a la vez que mueve brazos y piernas. Tras lanzarse con los brazos hacia abajo, eleva y extiende brazos y piernas al acercarse a la culminación del salto. Así, el centro de masa se desplazará hacia arriba respecto a su cuerpo y, como dicho punto sigue una trayectoria fija, ese cambio de postura supondrá que su cabeza y torso no se elevarán sobre el suelo tanto cuanto se esperaba. Durante el descenso la bailarina baja brazos y piernas, devolviendo el centro de masa a su posición habitual.

En el *jeté en tournant*, que es un salto con giro, la danzarina se proyecta en el aire sin rotación visible alguna en torno a su eje vertical; no obstante, al aproximarse a la cumbre comienza a rotar. ¿Imposible? Según una ley física indiscutible, el momento cinético de un objeto permanece constante, a menos que sobre el mismo actúe un momento de giro. Entonces, si la danzarina no giraba al abandonar el suelo, es imposible que comience a hacerlo en pleno aire.

La explicación del hecho es que ella sí estaba animada de una pequeña rotación al comienzo del salto, a consecuencia del momento de giro que recibió del suelo en el momento de lanzarse al aire. Ese giro es tan leve que no lo aprecia un observador normal. Pero, cuando se eleva, recoge los brazos y a la vez junta las piernas, con lo que disminuye su momento de inercia. Entonces, dado que su momento cinético no varía tras haberse lanzado al aire, la disminución de su momento de inercia hace que gire más rápidamente. Lo mismo acontece cuando una patinadora artística que gira sobre sí misma recoge los brazos, y, así, gira más veloz.

El *jeté en tournant* se inicia con los pies en la llamada quinta posición: pies paralelos y apuntados lateralmente en sentidos contrarios, el izquierdo delante, y cada talón junto a la puntera del otro pie. La bailarina desliza el pie izquierdo hacia la izquierda e, inmediatamente, entra en un *arabesque*. Luego dobla la rodilla izquierda en la postura llamada posición *demi-plié*.

Entonces, doblando enseguida la pierna derecha hacia abajo y adelante, se impulsa simultáneamente con la pierna izquierda. En su vuelo, no sólo se eleva sobre el suelo, sino que además viaja horizontalmente. Al comienzo del salto, tiene extendidos los brazos y una pierna, previendo aumentar su rapidez de giro con los movimientos ulteriores.

La bailarina aterriza sobre la pierna derecha y en *demi-plié*. Y debe hacerlo de cara al público, orientación que ha de conseguir tras reiterados ensayos en controlar el salto y su momento de inercia.

Otro salto, de la misma belleza pero más difícil, es el *grand jeté en tournant entrelacé* (llamado también *grand jeté en tournant,* o simplemente *tour jeté*). Se inicia con la pierna derecha en *demi-plié* y la izquierda alzada lateralmente a unos 45 grados con el suelo. A partir de esa postura, la bailarina retrocede sobre su pierna izquierda y eleva la derecha, adelantándola en círculo hasta apuntarla hacia la izquierda, a la vez que gira su cuerpo en el mismo sentido. Luego, da un salto sobre la pierna izquierda y, una vez en el aire, rota en torno a un eje inclinado respecto a la vertical. Esto lo hace manteniendo los brazos en alto y próximos al eje de rotación, izando además la pierna izquierda hacia la derecha de modo que ambas den vueltas alrededor del eje. El aterrizaje lo efectúa sobre la pierna derecha para entrar en *première arabesque*.

La rotación de la bailarina en pleno aire es rápida gracias a que su momento de inercia es pequeño, puesto que, tan pronto salta, coloca brazos y piernas paralelamente al eje de rotación. Pero una vez que ha dado la vuelta provoca la detención del giro extendiendo los brazos y la pierna derecha para preparar la toma de tierra.

En la danza académica existen numerosas técnicas para dar vueltas rápidamente. Una de ellas se materializa en el *soutenu en tournant*. Comenzando con los pies en quinta posición, el izquierdo delante, la bailarina entra en una *demi-plié* con su peso sobre la pierna izquierda y la derecha extendida lateralmente. Seguidamente, regresa a la quinta posición, colocando el pie derecho delante del izquierdo, y se alza de puntillas, con los pies entrelazados para generar el momento de giro capaz de iniciar su giro hacia la izquierda.

Una cabriola más ambiciosa es la *pirouette*, cuyo impulso procede asimismo de un momento de giro aplicado a los pies. Empecemos por la *pirouette* de un cuarto de vuelta. Partiendo de la quinta posición (pie derecho delante) se desplaza lateralmente el pie derecho, mientras se alargan los brazos hacia adelante y luego se extienden hacia los lados. A continuación, la mano derecha se traslada hacia delante y el pie

izquierdo hacia atrás. En ese momento la bailarina presiona contra el suelo con el pie derecho para impulsarse hacia la derecha. Simultáneamente se levanta sobre el pie izquierdo, que actúa de pivote.

La rotación provocada por el momento de giro del pie derecho se ve asistida por el hecho de que la bailarina recoge el brazo izquierdo. Este movimiento no sólo aumenta la gracilidad de la evolución, sino que, además, decrece el momento de inercia, permitiéndole ejecutar rápidamente el cuarto de vuelta. Tras caer, retornando a la quinta posición, la bailarina puede iniciar inmediatamente otro cuarto de vuelta.

La *pirouette complete* se distingue principalmente por el movimiento de la cabeza y la intensidad de la aceleración

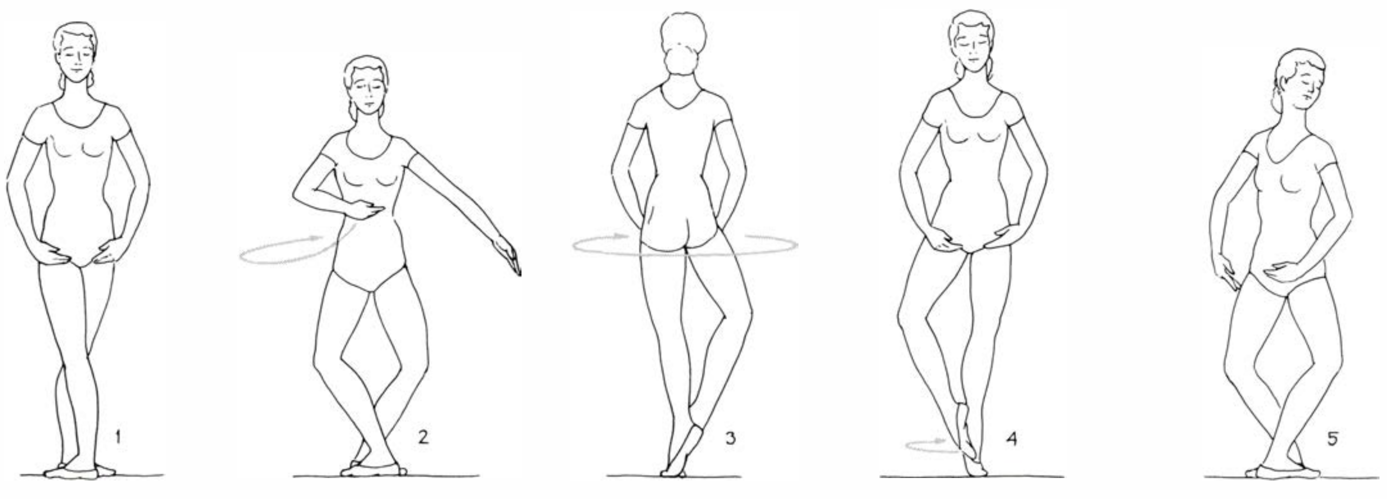
1 2 3

4 5 6

Grand jeté en tournant entrelacé



Soutenu en tournant



Fases de una pirouette en dehors

angular. Para una vuelta completa se necesita un momento de giro mayor. Al comienzo de la rotación la bailarina se mantiene mirando hacia adelante. Pero cuando su cuerpo ha girado unos 90 grados, enérgica y repentinamente hace bailar la cabeza en el sentido de giro, para volver a colocarla hacia el frente cuando su cuerpo ha girado unos 270 grados. Inmediatamente después tendrá también el cuerpo orientado hacia adelante.

La *grand pirouette* demanda que la bailarina rote manteniendo horizontales y hacia un lado una pierna y los dos brazos. Estudiar matemáticamente este movimiento resulta difícil, a menos que simplifiquemos la forma del cuerpo humano. Esto lo ha hecho Laws con el modelo que aparece en la ilustración inferior de esta página. El "cuerpo" se compone de una parte superior de masa M y longitud L y otra, de dos piezas, para las piernas. Cada "espinilla" y "pie" poseen una masa combinada de $m/3$ y una longitud de $L'/2$; la longitud del "muslo" es la misma, pero su masa es de $2m/3$. Para un bailarín masculino el cociente $M:m$ es del orden de 3,8 y L' es aproximadamente igual a L.

La parte superior del cuerpo se mantiene vertical durante todo el movimiento. En nuestro modelo para la *pirouette*, una pierna permanece horizontalmente hacia el lado. La pierna de apoyo queda rígida y forma un ángulo theta (θ) con el eje vertical que pasa por el pie correspondiente.

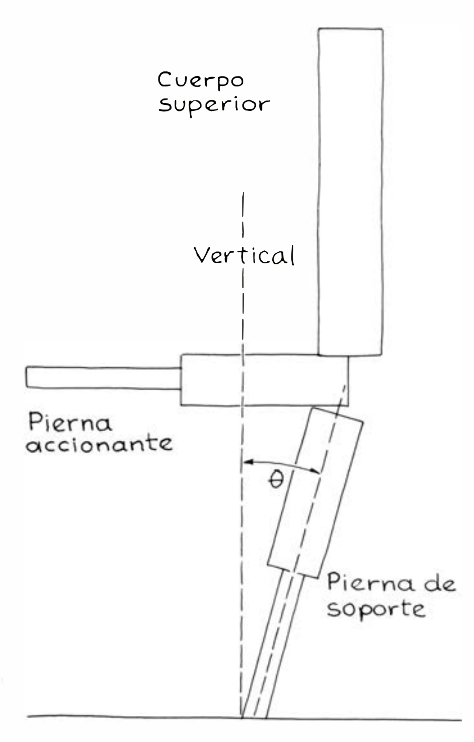
Laws centró su atención en el valor del ángulo necesario para que la rotación en torno al eje vertical fuera estable. Empezó calculándolo para un bailarín inmóvil. Como ya les he dicho, la condición de estabilidad es que el centro de masa de la bailarina se encuentre en la misma vertical que el punto de apoyo. Entonces, dado que tiene una pierna tendida horizontalmente hacia el lado, deberá inclinar la otra pierna al objeto de desplazar masa y reacomodar así el centro de masa. Se consigue estabilidad cuando el ángulo entre la pierna de apoyo y la vertical es aproximadamente de 4,4 grados.

¿Qué pasa cuando la bailarina gira en torno a sí misma? Hubiera dicho que ese valor es el mismo, pero los cálculos de Laws revelan que el ángulo es de unos 3,5 grados en ese caso. Es que la rotación impone limitaciones adicionales a la estabilidad. Así, la parte superior del cuerpo ha de acercarse al eje vertical y la pierna extendida debe estirarse más y, por ello, el centro de masa de la bailarina estará ligeramente separado del eje vertical; pero, pese a ello, se mantendrá estable.

De la vuelta *fouetté* forma parte una rotación más complicada. (En el acto III de *El lago de los cisnes*, el Cisne Negro ejecuta 32 vueltas consecutivas.) En líneas generales, el movimiento es una *pirouette* completa en la que permanece oculto el origen del momento de giro que actúa sobre la bailarina, quien prolonga sus vueltas cual si fuera una peonza movida por arte de magia.

Iniciada la *pirouette*, la pierna derecha no pisa el suelo hasta que cesa el giro. Durante casi todo el tiempo el pie derecho se mantiene junto a la rodilla de la pierna izquierda, que es la de apoyo y sobre la cual está de puntas la bailarina. En el preciso instante en que su cuerpo empieza a orientarse otra vez hacia el frente, proyecta hacia adelante la pierna derecha y se abre de brazos hacia el público. Entonces, lleva al suelo el talón del pie izquierdo y dobla la pierna izquierda. Seguidamente, traslada en círculo a la izquierda la pierna derecha, que seguía apuntada hacia fuera, prosiguiendo la rotación, mientras el resto del cuerpo permanece enfrentado al público. Cuando la pierna derecha ha rotado así unos 90 grados, el pie derecho vuelve a elevarse hacia la rodilla izquierda y la bailarina torna a ponerse *en pointe* (sobre la punta del pie izquierdo). Y así repite la acción completa.

El quid está en el modo en que la bailarina genera un momento de giro suficiente para prolongar la rotación. A cada vuelta el rozamiento entre el pie sustentador y el suelo le resta momento cinético y velocidad. Pero hay un secreto en el movimiento de su pierna derecha. Cuando ésta se adelanta y se hace girar hacia la derecha, recoge todo el



Simplificación de la grand pirouette

momento cinético que aún le queda a la bailarina. Esta cesa de rotar, pero no su pierna derecha, y dispone de un instante para apoyar en el suelo el pie izquierdo, con el que puede impulsarse, proveyéndose de momento de giro para dar otra vuelta. Para favorecer el efecto, eleva el pie derecho hasta la rodilla izquierda reduciendo su momento de inercia durante la rotación.

El *fouetté* es temido por los danzarines. Laws señala que un fallo de principiante muy corriente consiste en lanzar la pierna derecha directamente hacia el flanco, en vez de colocarla de modo que absorba correctamente el momento cinético. También puede ocurrir que el aprendiz extienda la pierna hacia el público sólo parcialmente, cuando debe extenderla totalmente para absorber todo el momento cinético.

El momento de inercia de la pierna tendida es del orden de 1,7 veces el del cuerpo. Por ello, cuando absorbe el momento cinético del cuerpo, ya no gira tan velozmente como éste. Así, si una *pirouette* normal se ejecuta a razón de dos vueltas por segundo, la pierna extendida gira sólo a 1,2. Entonces, si la pierna absorbe la totalidad del momento cinético de la bailarina, ésta dispondrá de 0,3 segundos aproximadamente para impulsarse a la vuelta siguiente.

En el *grand pas de chat* debe aplicarse la dinámica de la rotación para que la bailarina pueda brincar mientras conserva la orientación del cuerpo. A partir de la quinta posición de pies efectúa un *demi-plié* sobre el pie derecho, llevando la pierna izquierda detrás de la derecha formando un ángulo de unos 45 grados con la vertical. El salto lo da desde la pierna en que se apoya y, una vez en el aire, coloca la pierna derecha paralelamente a la izquierda.

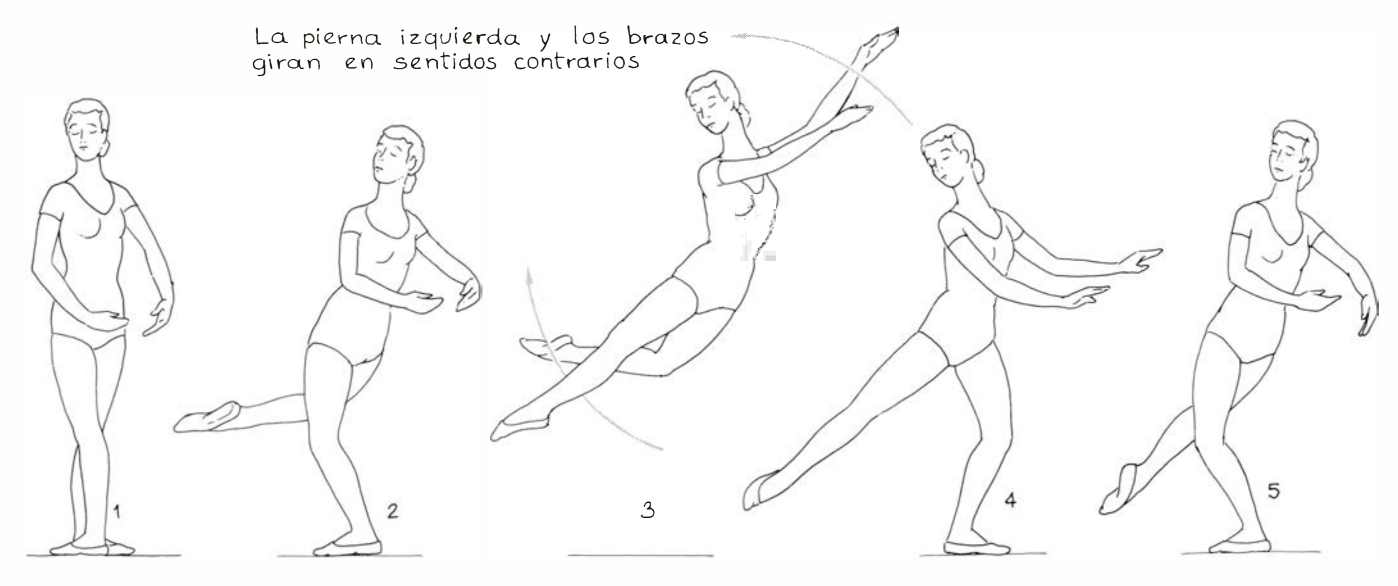
Para poner las piernas paralelas necesita que la pierna izquierda rote en torno a su centro de masa. Pero su momento cinético en pleno aire es virtualmente nulo. Entonces, ¿cómo se las arregla para conseguir esa rotación mientras mantiene constante su momento cinético y la orientación del cuerpo? Respuesta: girando los brazos en sentido contrario al de movimiento de la pierna izquierda. Los brazos los desplaza justo lo suficiente para que sea nulo el momento cinético combinado de los brazos y la pierna derecha, de modo que, merced a esas dos rotaciones antagónicas, puede hacer que parte de su cuerpo gire en el aire.

Laws ha analizado las sutilezas del equilibrio que se logra en la *promenade en attitude derrière*. Aquí el componente femenino de la pareja se encuentra en la posición *derrière en pointe*, de puntas sobre un pie y la otra pierna suspendida en el aire. Su compañero masculino, hacia el que está mirando, le sostiene una mano, mientras que la otra la tiene airosamente arqueada hacia arriba. A causa del equilibrio que exige se trata de una actitud de danza muy difícil y, si la bailarina llega a ella desde otro movimiento, es probable que pierda el equilibrio.

La bailarina podría corregir su equilibrio estirando el cuerpo al objeto de devolver el centro de masa a su posi-



Fouetté en tournant con dos vueltas distintas



Pas de chat

ción por encima del pie en el que se apoya, pero ello estropearía la gracilidad del movimiento. Podría también tirar de, o apoyarse en, la mano de su pareja, pero es probable que ello generase un momento de giro capaz de hacerla girar en torno al pie de soporte, alejándola de su pareja, cuando debe estar de cara a él.

Un procedimiento mejor consiste en lograr que las fuerzas que se desarrollan entre las manos en contacto se apliquen convenientemente. Según Laws, las manos de ambos bailarines deben estar horizontales y los codos alzados. Entonces, ella podrá aplicar las fuerzas sobre la mano de su pareja de manera que no se genere momento de giro. En la ilustración inferior de esta página se indican las fuerzas que actúan sobre su mano. De la mano del bailarín salen dos fuerzas de sentidos contrarios, separadas ambas una distancia d del centro de la misma. Este se halla a una distancia D del eje vertical que pasa por el pie en el que se apoya.

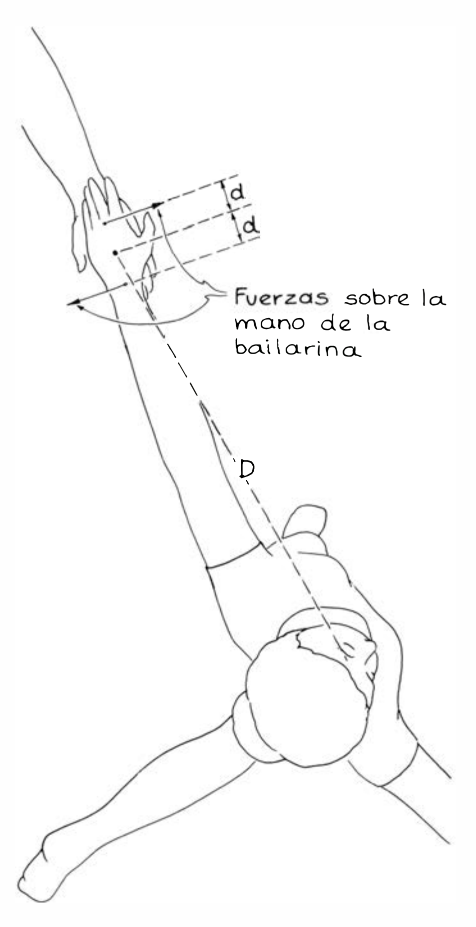
Las fuerzas que actúan sobre las manos generan momentos de giro sobre la bailarina, pero propenden a hacerla girar en sentidos contrarios. Entonces, controlando convenientemente dichas fuerzas, podrá hacer que se contrarresten. La fuerza más cercana debe hacerla ligeramente mayor que la más alejada. Efectivamente, como el momento de giro es el producto del brazo de palanca por la fuerza, así se anularán entre ellos ambos momentos de giro y, por ello, las fuerzas en cuestión no la harán rotar en torno a la pierna sobre la que está de puntillas. Pero, torciendo la mano del modo necesario, podrá acercarse o alejarse de la mano de su pareja, corrigiendo así la posición de su centro de masa sin que el público caiga en la cuenta de lo que está haciendo.

En algunos saltos masculinos, el bailarín debe entrechocar las pantorrillas mientras vuela. Uno de ellos es el *entrechat quatre*, que se inicia con los pies en quinta posición. El bailarín desciende luego a un *demi-plié* para propulsarse enseguida hacia arriba. En el aire, abre las piernas y vuelve a cerrarlas a la vez que aterriza en quinta posición *demi-plié*. Todo bailarín experto y dotado de un salto vigoroso debe ser capaz de realizar dos trenzados, o más.

Laws ha investigado la dificultad que presenta este movimiento para los bailarines de gran estatura. En general un bailarín corpulento no podrá entrechocar las piernas con el mismo ritmo y la amplitud que otro más bajo ya que, aunque el primero sea más vigoroso, sus piernas tienen una masa mayor y, por tanto, le costará más rotarlas. Además, debe elevar una masa mayor y encontrará más dificultad para saltar hasta la misma fracción de su estatura.

Sólo me he ocupado de los movimientos de la danza académica. El lector podría hacer bastantes cosas más. Para estudiar un movimiento de ballet podría resultarle útil impresionar una serie de fotografías con luz estroboscópica. Aún mejor sería una película que pudiera proyectarse a cámara lenta, o detenerse periódicamente. Ninguno de tales procedimientos le resultará sencillo, porque la forma y los movimientos del cuerpo humano son complicados. La forma del cuerpo puede simplificarse del modo en que Laws lo ha hecho en alguno de sus estudios.

El análisis del ballet se complica además porque exige gracilidad y estilo. Así, cuando se desean determinar los fundamentos subyacentes a ciertos movimientos, deben discriminarse los componentes del movimiento que se ejecutan sólo para mejorar el estilo. Laws y yo mismo estudiaremos con gran interés los hallazgos de los lectores.



Fuerzas equilibradoras en derrière en pointe

Libros

Hemisferios cerebrales, didáctica de la geometría, nuevo sistema solar y racionalidad y fonología

Ignacio Morgado, Sebastián Xambó, Jordi Isern y Daniel Quesada

LEFT BRAIN, RIGHT BRAIN, por S. P. Springer y G. Deutsch. W. H. Freeman and Co. San Francisco, 1981, 243 páginas. Como un signo más de la actualización y del creciente interés por los estudios neurobiológicos, esta obra trata de los problemas derivados de la duplicación hemisférica del cerebro, es decir, de las funciones e importancia relativa de cada uno de los hemisferios cerebrales en la determinación de las capacidades conductuales y de la conducta misma de los individuos. Su contenido se inscribe en el mismo marco de trabajos científicos que el de Roger Sperry, uno de los tres neurobiólogos que fueron galardonados con el último premio Nobel de medicina. S. P. Springer, co-autor de este libro, es profesor asociado de psicología en la Universidad estatal de Nueva York. Sus investigaciones fundamentales son de ámbito clínico y se refieren, sobre todo, al tratamiento de pacientes con daño cerebral y con cerebro hendido (aislamiento quirúrgico interhemisférico), con especial interés en los mecanismos cerebrales para el habla y el lenguaje. G. Deutsch, autor también de esta obra, es neuropsicólogo del Burke Rehabilitation Center norteamericano y en sus trabajos hay diversas evaluaciones y pruebas en pacientes con daño neurológico.

El libro se divide en 10 capítulos a lo largo de los cuales se revisan diferentes aspectos, tanto teóricos como clínicos y experimentales, relacionados con el tema mencionado. Las opiniones sobre las funciones de ambos hemisferios cerebrales se han dividido tradicionalmente entre quienes han pensado que todo el cerebro estaría involucrado en cada función, quienes han creído que uno de los dos hemisferios tendría un carácter dominante sobre la función del otro y quienes argumentan que las dos mitades del cerebro contribuyen a la conducta mediante sus capacidades específicas. Esta última parece ser la opinión de Springer y Deutsch, quienes, en el primer capítulo de esta obra ("A historical overview of clinical evidence for brain asymmetries"), hacen una revisión histórica de las observaciones clínicas que permiten sugerir que cada hemisferio cerebral contribuye, de un modo específico (mediante funciones especializadas), al conjunto de la conducta humana. A lo largo de este capítulo podemos conocer que las lesiones de cada hemisferio han originado déficits conductuales característicos, diferentes de los que resultan de las lesiones del hemisferio contrario. Por otro lado, las observaciones clínicas y diferentes tipos de pruebas de rendimiento en tareas específicas en pacientes con cerebro hendido han permitido concluir a los autores de este trabajo que la especialización hemisférica no es un fenómeno "todo o nada", sino más bien un continuum (capítulo 2: "Split-brain research"). Cualquier conducta humana, cualquier función mental, parece involucrar las especialidades de uno u otro hemisferio y utiliza lo que es común a ambos. Cada hemisferio puede ser capaz de realizar muchos tipos de tareas, e incluso a veces las mismas tareas pueden ser realizadas por cualquiera de los hemisferios, pero difieren entre ellos en el procedimiento utilizado y en la eficacia de su función. En el capítulo 3 ("Studying asymmetries in the normal brain") se revisan diversos estudios de exploración de diferencias hemisféricas en sujetos normales. La variable dependiente observada fue la conducta de los sujetos y los resultados se muestran en consonancia con los obtenidos en los estudios de pacientes con lesiones cerebrales o cerebro hendido. Es decir, se observan diferencias interhemisféricas referidas, sobre todo, a las diferentes estrategias que utiliza cada hemisferio en la solución de problemas. Y, además de las observaciones conductuales, algunos investigadores han utilizado medidas anatómicas (tamaño de los hemisferios o de las circunvoluciones, etcétera), electrofisiológicas (electroencefalografía, potenciales evocados) o metabólicas (aporte o consumo de glucosa en cada hemisferio) para explorar las diferencias funcionales interhemisféricas. En el capítulo 4 ("Activity and anatomy: Physiological correlates of function") se revisan algunos de estos trabajos, los cuales ponen también de manifiesto la existencia de asimetrías interhemisféricas. Así, en uno de ellos, la amplitud de los potenciales evocados en el hemisferio izquierdo (hemisferio especializado en funciones del lenguaje) ante estímulos verbales fue mayor que la de los potenciales evocados en las mismas circunstancias en el hemisferio derecho (hemisferio especializado en funciones no verbales).

El capítulo 5 ("The puzzle of the left-hander") es, a nuestro juicio, uno de los más interesantes de esta obra. Trata de la preferencia por la mano izquierda, del caso de los zurdos. Aunque dominan las personas diestras (utilizan preferentemente su mano derecha para la mayoría de manipulaciones), al menos un 10 por ciento son zurdas o utilizan indistinta o especializadamente ambas manos. ¿Cuál es la naturaleza de estas diferencias? Para intentar responder a esta cuestión los autores revisan algunas teorías sobre un origen genético de la lateralización y estudian también las posibles influencias ambientales sobre la misma. Frente a quienes están convencidos de que la preferencia por la mano izquierda es de origen genético, hay quien sugiere que la misma es el resultado de alguna alteración o daño temprano en el hemisferio izquierdo (el que controla básicamente los movimientos de la mano derecha). Springer y Deutsch afirman que cada una de estas teorías puede aportar algún elemento de comprensión de los hechos. Por otro lado, una abundante documentación experimental indica también que las hembras son superiores a los machos en un amplio rango de habilidades que requieren el uso del lenguaje, mientras que los machos parecen superiores en tareas o habilidades donde la percepción espacial desempeña un papel primordial. El capítulo 6 de esta obra ("Sex and asymmetry") analiza dichas pruebas, es decir, analiza las diferencias sexuales en procesos de lateralización hemisférica y también algunas teorías sobre el origen de esas diferencias y sobre el posible significado funcional de las mismas. En el capítulo 8 ("Asymmetries in animals") se revisan diferentes estudios de lateralización en animales inferiores y se comparan los resultados observados con los correspondientes a los humanos. De este capítulo destacan los trabajos realizados en el canario, un ave donde ha podido demostrarse un alto grado de lateralización hemisférica en relación con su habilidad cantora.

El capítulo 9 ("Pathology of the he-

mispheres") es de especial interés clínico. Trata de los desórdenes y anormalidades de la conducta humana que han sido relacionados de algún modo con alteraciones de la división de funciones entre ambos hemisferios. Los disléxicos, por ejemplo, pueden mostrar representaciones bilaterales de ciertas habilidades, como la correspondencia visual de formas, que, presuntamente, son dependientes del hemisferio derecho y que se relacionan con este tipo de trastorno. En estos mismos individuos, otros tipos de habilidades (como, por ejemplo, el reconocimiento visual de rostros) parecen estar lateralizados en el mismo grado que en individuos normales. Un ejemplo más lo tenemos en los zurdos tartamudos. En este caso se ha sugerido que la presión de algunos padres para que sus hijos utilicen la mano derecha podría originar problemas de competición interhemisférica responsables del tartamudeo. Este capítulo considera también las relaciones entre algunas enfermedades psiquiátricas y los procesos de lateralización. Algunas observaciones clínicas y experimentales sugieren que los esquizofrénicos utilizan el hemisferio izquierdo en mayor grado que el derecho. Parece haber razones para pensar que la esquizofrenia y los desórdenes afectivos podrían involucrar causas patológicas relativas, específicamente, a los hemisferios izquierdo y derecho. Asimismo, un tipo de anormalidad conductual que ha podido ser asociado claramente a un factor de lateralización es el llamado "síndrome de negligencia", el cual se caracteriza por una especie de "olvido" o "negligencia" conductual relativa a una mitad del cuerpo: el enfermo sólo se afeita la mitad derecha de su cara, sólo come la mitad derecha de su plato, sólo dibuja la mitad derecha de un dibujo, etcétera. Este síndrome parece siempre consecuente a las lesiones de las regiones posteriores del hemisferio derecho.

El conjunto de planteamientos y de problemas que hemos resumido para cada uno de los capítulos de este libro son abordados con detalle a lo largo del mismo. Todo ello se completa con un capítulo especial (capítulo 10: "Beyond the data: Speculative issues") en el que se especula acerca de los problemas implicados en la asimetría del cerebro y en la naturaleza del mismo: la relación mente-cuerpo, la posibilidad de que cada hemisferio pudiera tener una conciencia independiente, las posibles diferencias culturales en hemisfericidad, la posibilidad de que la cultura occidental se base en una utilización preferente del hemisferio izquierdo e infrautilice el derecho, el porqué de la lateralización, etcétera. Al final de todo, hay también un apéndice que proporciona información básica sobre neuroanatomía funcional (áreas funcionales del córtex) y sobre algunos desórdenes (apraxias, agnosias, afasias, etc.).

A nuestro entender, éste es un libro cuyo contenido es actual, bien estructurado y fácilmente asequible incluso por individuos con una formación elemental en psicobiología. Se caracteriza por su claridad didáctica y expositiva, está bien ilustrado mediante dibujos y fotografías que facilitan la comprensión del texto y abunda en explicaciones básicas sobre los conceptos que utiliza. Y no creemos que todo ello se consiga a costa de no profundizar en los problemas. En el método de trabajo de los autores de esta obra encontramos una pulcra actitud científica que les hace huir en cada momento de conclusiones imprudentes y que les lleva a plantearse continuamente las réplicas y contrarréplicas posibles ante cualquier interpretación de los hechos que se estudian. El libro está lleno de interrogantes metodológicos.

Los dos autores no se han limitado a la búsqueda y catalogación de diferencias funcionales interhemisféricas, sino que hacen lo posible por profundizar en las causas y en el sentido de las mismas. Sus razonamientos les llevan a plantear hipótesis interesantes que pueden ser la base de futuras investigaciones. Por otro lado el tema de la lateralización hemisférica está tratado en esta obra desde casi todos los ángulos posibles, y el lector de la misma observará que todas las aproximaciones no parecen tener la misma consideración en el texto. Por ejemplo, resultan escasos y pobres los trabajos citados en cuanto a estudios de comparación de las actividades de cada hemisferio a nivel electrofisiológico mientras que son abundantes los que se refieren a los estudios conductuales realizados en la clínica. Ello no parece ser culpa de los autores del texto ya que todavía están sin desarrollar los estudios de lateralización que podemos considerar, en general, de nivel más molecular, es decir, neuroanatómicos, electrofisiológicos y bioquímicos. Nos parece, en fin, que este libro, además de imprescindible en el ámbito del conocimiento fundamental, puede ser de gran utilidad tanto en el campo de la psicología clínica, donde puede aportar elementos de juicio para el estudio etiológico y terapéutico de los desórdenes y anormalidades conductuales, como en el de la psicología evolutiva y educacional, donde, sin duda, contribuirá a un mejor análisis de los factores que determinan los procesos de aprendizaje y de las estrategias que el cerebro utiliza para solucionar cualquier problema o ejecutar cualquier respuesta. (I. M.)

La Geometria, por Emma Castelnuovo. Ed. Ketres, Barcelona, 1981. Este libro, junto con otro de la misma autora titulado "Los números", forman una obra única sobre "La Matemática". Corresponde al segundo ciclo de enseñanza básica en Italia (edades entre 11 y 14 años). Ahora ha sido traducido al catalán y pronto aparecerá también la traducción de "Los números". Según mis informes se está preparando una edición en castellano. Como dice la autora en su prólogo a la edición catalana, este libro se separa de las presentaciones usuales de esta materia y en todo caso no corresponde a los programas vigentes en España. Este libro no es "tradicional", si por ello se entiende, en palabras de un autor de libros de EGB, "aprender definiciones y mecanismos de cálculo". Tampoco es un libro moderno, si por moderno se entiende un libro inspirado en los cánones de la presentación "bourbakista" de las matemáticas. Es un libro distinto, original, que penetra profundamente en la estructura de las matemáticas, y de la geometría en particular, de lectura obligada para todos cuantos están preocupados por la enseñanza de las matemáticas, para aquellos de quienes depende la confección y desarrollo de programas y posiblemente para quienes aún creen que pueden superar el "trauma de las matemáticas".

Hay varios hilos conductores que pueden seguirse a lo largo de este texto. Unos son explíticos y patentes y otros son sutiles, pero todos ellos están maravillosamente entrelazados formando un todo armónico. Así, las figuras más importantes del plano y del espacio se presentan por medio de descripciones intuitivas que surgen a través de experiencias al alcance de los alumnos. Este deseo constante de proporcionar "experiencia" lo ponen de manifiesto las 624 figuras que acompañan a las explicaciones, de las cuales una buena parte son fotografías que van desde material didáctico hasta copos de nieve o animales. También cabe mencionar su preocupación por el origen y significación históricos de los problemas y propiedades más importantes, así como las conexiones, a veces bastante ocultas, con determinadas formas de expresión artística. A este respecto señalemos la magnífica colección de láminas al final del libro. Se trata de un conjunto de 38 reproducciones (28 de ellas en

color) que ilustran cómo se incorporan las más diversas concepciones geométricas en la ingeniería, en los mosaicos, en la arquitectura, en el mundo animal, en la pintura o en la ciencia. Dos láminas reproducen tablillas babilónicas en las que están tratados ciertos problemas geométricos y otra reproduce el papiro Rhind. La lámina XII, con todos los rasgos de un cuadro abstracto, es la reproducción del trabajo que un alumno hizo sobre "una extensión de la propiedad pitagórica".

La distribución del material tiene tres partes bien diferenciadas. En la primera se estudia la geometría plana y se abordan temas tales como los polígonos, las simetrías, longitudes y áreas, el teorema de Pitágoras, la igualdad y la semejanza, los rudimentos del plano afín (incluyendo una introducción a la programación lineal por medio de dos ejemplos en dos variables), y un capítulo dedicado al círculo, que contiene una discusión preciosa sobre el número π. En la segunda parte se estudia la geometría en el espacio y se detiene en los poliedros (en particular, los poliedros regulares, las pirámides y los prismas), los conos y cilindros y la esfera. La sección dedicada a la esfera incluye la ingeniosa demostración de Luca Valerio de que el volumen de la esfera vale $4/3\ \pi r^3$, r el radio. (La observación de Valerio, a principios del XVII, fue que si tomamos un cilindro recto con altura y radio de la base iguales a r y de este cilindro extraemos una semiesfera inscrita, que tiene por tanto radio r, entonces el volumen del cuerpo resultante es igual al volumen del cono recto cuya altura y radio de la base son también r; la igualdad de estos volúmenes se deduce del principio de Cavalieri según el cual dos cuerpos tienen el mismo volumen si al cortarlos por cierto plano que se mueve paralelo a sí mismo se obtienen sendas secciones de igual área.)

Contiene, por último, una tercera parte compuesta de problemas y ejercicios y de cuatro secciones de complementos cuyo objeto es mostrar "cómo valerse de la geometría para comprender mejor problemas de física, de tecnología y de comunicación visual". Los problemas constituyen una de las facetas más interesantes del libro, por cuanto forman una cuidadosa selección para practicar las ideas desarrolladas en el texto y también para ampliar estas ideas y ponerlas en relación con otros contextos teóricos y prácticos. En total hay unos 940 problemas, de los cuales alrededor de 640 se refieren a geometría plana, 240 a geometría del espacio y el resto a los complementos. A veces se llega a un nivel bastante elevado, como por ejemplo cuando se pide que se apliquen las leyes de la simetría para explicar las imágenes en un caleidoscopio, o cuando se aplican las consideraciones sobre el baricentro del triángulo a la teoría de los colores, o cuando se enseña a calcular centros de gravedad por medio de los teoremas de Guldin (que se dan como "intuitivos"). Pero la mayoría de los problemas están al alcance del alumno medio.

¿Qué principios ha seguido la autora para organizar toda esta riqueza de materiales? El espacio disponible no nos permite examinarlos todos. Entre los más importantes está el siguiente: "a través de los problemas motivados por una dinámica concreta y de las variadas cuestiones que plantea la realidad en que vivimos, se incita a los alumnos a construir ellos mismos las matemáticas con la ayuda del profesor". Parece claro que para E. Castelnuovo la geometría desempeña un papel primordial en la introducción de todos los conceptos matemáticos básicos (conjuntos, relaciones, funciones, cálculo algebraico y razonamiento lógico) por cuanto es intermediaria entre la realidad sensible, la realidad visual sobre todo, y las abstracciones propias de las matemáticas. Como es previsible, se intenta relacionar constantemente toda situación concreta que se haya planteado con el mayor número de conceptos matemáticos relevantes para la misma y de extraer de ellos aplicaciones interesantes. De las relaciones algebraicas se extraen imágenes que den un contenido a la relación.

Otro principio organizador es el de dar la preeminencia a la noción de transformación, en particular la de simetría, que, en su presentación, siempre tiene un contenido intuitivo, como reflexiones en un espejo, movimientos mecánicos, rotaciones, ampliaciones o reducciones, o bien la transformación que se observa al cortar una figura en el espacio por un plano variable. Aunque la noción de grupo de transformaciones nunca se menciona, las ideas directrices apuntan a una visión emparentada con la concepción de Klein de que una geometría es el estudio de las relaciones invariantes por un tal grupo. De este modo se establece una división nítida, aunque no se explicita nunca, entre propiedades métricas, que son las invariantes por el grupo de los movimientos, y las afines, que son las invariantes por las transformaciones lineales que transforman rectas paralelas en rectas paralelas. Aquí transformación lineal significa que transforma rectas en rectas. Se hace también observar que hay transformaciones lineales, como la que pasa de una figura plana a su sombra en otro plano, proyectada por un foco de luz puntual, que en general no son afines. Como dice la autora en el prólogo "esta geometría dinámica ayudará, a través del concepto de función y de transformación, a pasar de la observación concreta a un saber ver en matemáticas y a ligar las matemáticas con las ciencias experimentales, con la técnica, con el arte, y ofrecerá así a los alumnos, desde la misma etapa obligatoria, una amplia visión científica y un continuo incentivo para la investigación".

En ocasiones utiliza el método que se ha dado en llamar de "conjeturas y refutaciones". Por ejemplo, para ver que la suma de los ángulos de un triángulo es de dos rectos, primero sugiere que el triángulo en cuestión se transforme en dos casos límite, a saber, aquel en que un vértice se aleja indefinidamente y aquél en que un vértice tiende al lado opuesto. En ambos casos la suma de los ángulos en el límite es de dos rectos, lo cual lleva a los alumnos a conjeturar que tal propiedad es válida para todos los triángulos. Analiza luego el caso particular de los triángulos rectángulos y se muestra que la conjetura es cierta. Por último, la descomposición de un triángulo como suma de dos rectángulos lleva a la demostración de la conjetura. En muchos casos la primera conjetura se ve refutada al contrastarla con uno o varios contraejemplos y es entonces cuando los alumnos se ven forzados a buscar otra más refinada, y así sucesivamente hasta que llegan a la afirmación de una proposición correcta. Está claro que este método está mucho más cercano del proceso por el cual aprendemos de la experiencia, y por tanto del método científico, que una exposición basada en axiomas y definiciones intocables.

A veces la autora no se guía por la norma de que es el estudiante quien ha de descubrir las propiedades y se decide por suscitar en el mismo una reacción ¡ajá! que de otro modo sería muy improbable que tuviera. Para demostrar que los ángulos exteriores de un polígono convexo cualquiera suman cuatro rectos, hace recorrer el perímetro del mismo (de un modo imaginario o real, tanto da) por el alumno y le hace observar que al final ha dado de un lado una vuelta completa sobre sí mismo y de otro que este giro es la suma de los giros parciales efectuados en cada esquina del polígono, cada uno de los cuales es igual al correspondiente ángulo exterior.

Hay momentos en que todo está preparado para dar demostraciones sencillas de alguna propiedad y que, sin em-

bargo, la omite tácitamente. Ocurre eso con la demostración de la existencia del circuncentro, o sea, que las mediatrices de los lados de un triángulo se cortan en un punto. Aquí sería natural observar que la intersección de las mediatrices de dos lados del triángulo es el centro de una circunferencia que pasa por los vértices del triángulo y por tanto está sobre la mediatriz del tercer lado. Una consideración análoga se puede aplicar a la existencia del incentro, o sea, el punto común a las tres bisectrices del triángulo. En este caso se da además la circunstancia de que en la página 134 afirma que "ya conocemos" la existencia del incentro, remitiendo a la página 69 donde simplemente se ha afirmado que existe. Lo mismo se puede decir sobre la propiedad de que un ángulo en una circunferencia es igual a la mitad de su ángulo central, que sólo la hace ver en el caso en que un lado pasa por el centro de la circunferencia, cuando para ángulos cualesquiera se reduce inmediatamente a este caso. En la página 146 utiliza la palabra "paralelepípedo" y en cambio no la define, o no la explica, hasta la página 148.

En el libro se detectan un cierto número de erratas. Algunas son tipográficas, como por ejemplo la omisión de la letra c en la figura 381 para designar la arista vertical. Pero otras pueden producir cierta desazón. He aquí una lista de las más importantes que he registrado. En la última línea de la primera columna de la página 59, la primera ocurrencia del signo de raíz cuadrada ha de prolongarse hasta incluir 4^2. En la línea 13 de la primera columna de la página 67, en lugar de 180^r ha de poner 180°. En la línea 9 de la primera columna de la página 68, en lugar de $438^o = 360^o + 78^o$ debiera poner $439^o = 360^o + 79^o$. En la figura 169, H y M están intercambiadas. En la figura 250, la ordenada de C es $+1$, no -1. En la cuarta línea empezando por abajo de la primera columna de la página 136, en lugar de BOC debiera haber BOA. En la relación (2) de la página 282 en lugar de "semicircunferència descrita pel baricentre G" debiera poner "circunferència descrita pel baricentre G". Por último, en la segunda línea de la segunda columna de la página 49, donde dice "rectangles" debiera decir "triangles".

Para los usuarios del libro es muy útil la inclusión de tablas de cuadrados, cubos, raíces cuadradas y raíces cúbicas de todos los números entre 1 y 1000, las cuales serán de uso frecuente, por ejemplo, en los problemas donde interviene el teorema de Pitágoras, o en problemas de áreas y volúmenes, aunque cabe observar que en la actualidad el uso masivo de las calculadoras de bolsillo las hace más dispensables. También incluye una tabla de los números primos menores que 5000. Y una curiosidad: en la página 131 se puede hallar el número π con mil cifras decimales.

Sobre el trabajo de edición y la traducción me limitaré a referir las propias palabras de E. Castelnuovo en el prólogo: "Quiero agradecer a Hortènsia Curell y a Joaquim Giménez, así como al resto de los componentes de 'Periòdica pura', el esmero que han tenido en la versión catalana, y a Ketres Editora por su bellísima edición". No podría añadir nada mejor. (S. X.)

THE NEW SOLAR SYSTEM, editado por J. K. Beatty, B. O'Leare y A. Chaikin. Cambridge University Press, 1981, 224 páginas. Libro atractivo de contenido muy desigual que está compuesto por veinte capítulos firmados por otros tantos reconocidos especialistas en el tema en cuestión. A priori, esta fórmula garantiza su interés, pero encierra grandes dificultades de coordinación y homogeneización que no han sido resueltas en este caso. Esto se traduce en la coexistencia de artículos de calidad muy diferente. A pesar de todo, el balance global es positivo y consigue dar una idea bastante clara del estado actual de nuestro conocimiento sobre el sistema solar.

Tal vez el principal inconveniente radique en que no queda bien definido el tipo de lector a quien va dirigido, lo que provoca la insatisfacción de todos. No se trata ni de un libro de sobremesa, ni de texto, ni de divulgación. La calidad de la impresión, unida a las excelentes fotografías y diagramas, lo acercan a un libro de regalo, pero su nivel científico lo inscribe entre los manuales universitarios. La falta de expresiones matemáticas y de prolijas explicaciones le confieren un aire de divulgación, pero queda despojado de cualquier valor pedagógico al dar por supuesto que el lector está familiarizado con un sinfín de conceptos astrofísicos y por carecer de una estructura lógica en la presentación de los temas.

El capítulo dedicado al Sol constituye un buen ejemplo de todo lo dicho. Su autor es un conocido especialista en física solar, lo que garantiza un texto científicamente correcto, a pesar de presentar de manera taxativa algunas cuestiones que todavía no se hallan resueltas. Pero un capítulo no puede titularse "el Sol" y limitarse a hablar de su atmósfera. Además, para asimilar los conceptos que presenta se necesitan una serie de conocimientos de física y astrofísica que la mayoría de los lectores no poseen. Hubiera valido la pena describir los fenómenos solares.

Probablemente uno de los aciertos de este libro sea su renuncia al estudio singular de cada planeta en aras de un análisis comparado de sus estructuras. Este método, de innegable interés, permite reducir el solapamiento de capítulos, comprender el comportamiento de sistemas físicos similares frente a diferentes condiciones y adaptarse a la especialización con que se adquieren los conocimientos, pero tiene el inconveniente de que los temas interdisciplinarios pueden ser tratados mal y que se pierda de vista el comportamiento global de cada planeta.

En este sentido, el capítulo tercero, sobre "Magnetosferas y el medio interplanetario", resulta muy ilustrativo. Proporciona una buena descripción de la interacción del campo magnético de los planetas con el viento solar, pero no se describen las propiedades del viento solar ni sus efectos sobre el planeta, ni tampoco se explica cuál es el origen de los campos magnéticos planetarios.

Los capítulos 4, 5 y 6 –"La colisión de cuerpos sólidos", "La superficie de los planetas terrestres" y "Las atmósferas de los planetas terrestres"– junto con los dedicados a la Luna (el séptimo) y Marte (octavo) constituyen una unidad centrada en los planetas interiores. El capítulo 4 es excelente. El quinto ofrece una interesante pincelada sobre los procesos que moldean la superficie de los planetas, pero seis páginas son insuficientes ante la envergadura del tema. Del sexto vale decir lo mismo, aunque la última parte, en torno a los cambios climáticos, se resiente de una excesiva especulación. En todos estos capítulos aparecen claramente las dificultades apuntadas antes: asistimos a una descripción de la superficie de los planetas, de su atmósfera, pero no se adentra en su estructura interna, ni revela la influencia de ésta sobre la forma de la superficie, ni la interacción entre la superficie y la atmósfera. Ordenado y muy ponderado, el capítulo dedicado a la Luna. El dedicado a Marte intenta cubrir las lagunas apuntadas, si bien se limita a la superficie y continúa proporcionando una imagen parcial del planeta. Añadido a este grupo, está el capítulo 9: "Vida en Marte", que sólo cuenta generalidades.

Los capítulos 11 al 16 versan sobre los planetas exteriores. El primero de ellos recoge las peripecias de las sondas Voyager durante su viaje a Júpiter y Saturno. Su supresión no hubiera mermado el interés del libro. "Júpiter y Sa-

turno" y "Anillos planetarios" (capítulos 12 y 13, respectivamente) son dos artículos excelentes que proporcionan un examen ameno y detallado de las propiedades de los planetas gigantes y de los anillos. Como de buena factura son los inmediatos sobre los satélites galileanos y Titán. Quizás encierren uno de los mayores aciertos del libro, pues el resto de los satélites de Júpiter y de Saturno, junto con Fobos y Deimos, son tratados como asteroides capturados en el capítulo 19, apartado donde se abordan con la importancia que merecen los llamados objetos menores del sistema solar. La descripción de los objetos mayores queda completa con el capítulo 16, que se ocupa de la parte más externa del sistema solar.

Los planetas "menores" –asteroides, cometas y meteoritos– junto con el capítulo 19 forman un conjunto de cuatro capítulos donde hallamos lo más logrado de la obra. Se cierra el libro con una pretendida visión global del sistema solar, pero se limita a tratar de modo muy superficial el tema de su formación; presenta una sola teoría entre las múltiples que existen. (J. I.)

RACIONALIDAD Y ACCIÓN HUMANA, por Jesús Mosterín. Alianza Editorial; Madrid, 1978. LA ORTOGRAFÍA FONÉMICA DEL ESPAÑOL, del mismo autor y publicado por la misma editorial en 1981. A juzgar solamente por los títulos, los libros de Mosterín difícilmente podrían tratar temas más dispares. Tienen sin embargo una relación profunda que es importante resaltar. Pero vayamos por partes.

El libro *Racionalidad y acción humana* es uno de los más frescos, provocativos y vigorizantes títulos de la producción filosófica de habla hispana en los últimos años. El escaso eco que hasta ahora ha encontrado, más que suponer una injusticia para con su contenido, hace justicia cabal a los intelectuales de ese habla, poniendo claramente de relieve la ausencia de una condición sin la cual la producción filosófica deviene en pura cháchara y pavoneo: la existencia de un foro donde realmente se comenten y critiquen las ideas con buen conocimiento y suficiente comprensión de las mismas.

No estamos en presencia de un libro admirable en la totalidad de sus aspectos, pero sí de un libro sobre temas importantes –decisivos– escrito con una claridad y fluidez admirables en un tema filosófico, un libro a veces incluso divertido, que provoca nuestro asentimiento, perplejidad, irritación o alarma en muchas de sus páginas. Un libro, en fin, que se sitúa en el punto diametralmente opuesto al pesimismo irracionalista que invade nuestra cultura.

El libro está dividido en cinco partes que han sido escritas en ocasiones distintas, con lo que hay algunas repeticiones y reelaboraciones de los mismos temas. En "El concepto de racionalidad" se exponen las líneas generales del análisis que Mosterín hace de ese concepto. En la segunda parte se reelabora ese análisis, introduciéndose una distinción entre intereses y deseos en la que muchos encontrarán motivo de discusión. Se aplican también estos conceptos al diagnóstico de algunos de los males de nuestra vida individual y colectiva, cuya causa la encuentra el autor en la incompleta racionalidad.

La tercera y la quinta parte son los platos fuertes del menú, aunque por razones bien distintas. En la tercera parte se habla de una manera aguda, desenvuelta y desenfadada (que no excluye cierta superficialidad) de la racionalidad e irracionalidad de modos de vida, de conductas, del amor, de las instituciones de todo tipo y se aborda, además, de un modo muy sugerente el tema de la alienación. Mosterín aplica aquí sus principios de la racionalidad de un modo impecable e implacable, con contundente lógica, tanto si habla de la racionalidad del amor, pongamos por ejemplo, como de la irracionalidad de instituciones como el ejército o de la alienación que supone proseguir los supuestos fines de ese animal metafísico (una de sus expresiones más felices) que es la patria. Todo lo que dice es discutible. Nada más decepcionante que comprobar que apenas ha suscitado debate.

A partir de aquí el libro se hace filosóficamente más denso, sin perder nada de su claridad. En la cuarta parte se examinan los conceptos de *creer, saber* y *conocer*. Por fin, en la quinta parte, se realiza un análisis pormenorizado del concepto de acción y conceptos relacionados: los diversos tipos de acción (*mediada, básica, compuesta, convencional, colectiva*), el sentido y la interpretación de una acción. Entre las acciones se incluyen los actos de habla, lo cual lleva al tema del lenguaje.

Quisiera hacer dos observaciones de carácter crítico. Una general. La otra, más marginal dado el tema del libro, atañe, sin embargo, a una cuestión por la que tengo especial interés.

El marco general en que Mosterín aborda su análisis de los conceptos de racionalidad y acción es, en un sentido amplio, el aristotélico: la acción se realiza por la combinación de una intención y una creencia. Este marco, en gran parte el del sentido común, es bastante pobre para enfrentarnos al análisis de las acciones de los humanes (neologismo que Mosterín utiliza para referirse a los seres humanos en general). Cuando una persona, por ejemplo, está considerando la posibilidad de someterse a una operación para tratar de solucionar un problema de salud, sopesa las diferentes consecuencias probables de varios cursos de acción (operarse en tal clínica, en tal otra, no operarse en absoluto) en cuanto a la deseabilidad de esas consecuencias y su probabilidad. Este planteamiento tan común se sale totalmente fuera del marco aristotélico y nos introduce en otro mundo de ideas considerablemente distinto, el marco bayesiano de la teoría de la decisión. Mosterín reconoce en el prólogo el interés de la teoría de la decisión y la teoría de juegos para el tema de la racionalidad. Si las deja de lado –dice– es porque pretende una clarificación previa. Sin embargo, es sumamente dudoso que pueda obtenerse una clarificación del concepto de racionalidad dejando de lado totalmente el marco conceptual de esas teorías. Creo que varias de las conclusiones de Mosterín no podrían mantenerse si se ampliara el análisis para incluir la consideración de diferentes cursos de acción alternativos, sus consecuencias, deseabilidad y probabilidad, y la articulación de todos estos extremos.

La última objeción se refiere a los conceptos de *creencia*, *idea* y *significado*. Mosterín identifica correctamente el *contenido* de una creencia con una *idea* (en su terminología). Así, si yo creo que el Sr. Restrepo ha arreglado el ascensor y éste está presente, puedo expresar mi creencia dirigiéndome a él y diciendo: "Vd. ha arreglado el ascensor". Los dos hemos expresado la misma idea con nuestras proferencias. Tenemos la misma creencia, lo que creemos es lo mismo.

Sin embargo, esta noción de creencia no es útil para interpretar acciones. Mosterín no explicita el papel que desempeñan las creencias en la interpretación de las acciones. La opinión tradicional es que son un parámetro a tener en cuenta en esa interpretación. (D. Davidson ha escrito brillantemente sobre este tema.) Ahora bien, supongamos que dos profesores sentados en algún sillón de sus despachos o seminarios respectivos se digan para sus adentros: "Mi clase comienza dentro de un par de minutos". Aunque se lo digan en el mismo instante es obvio que sus creencias son distintas, en la terminolo-

gía de Mosterín las ideas creídas son diferentes, puesto que se refieren a personas y clases diferentes. Sin embargo, hay algo en común en esas creencias distintas: sirven para que entendamos porqué en ese momento los dos profesores comienzan a recoger sus notas y libros y se preparan para salir. Podemos decir: su estado mental de creencia es el mismo. Esta es la noción útil para interpretar las acciones de los dos profesores, como J. Perry ha señalado. Se echa en falta en el análisis de Mosterín.

Supongamos por último que los profesores mencionados hubieran proferido (ante alguien): "Mi clase comienza dentro de un par de minutos". Hay una noción de significado –la que Mosterín expone– según la cual esas dos proferencias significan cosas distintas. Pero es preciso señalar que hay también *otra* noción según la cual el significado de las correspondientes oraciones sería el mismo. Esta noción de significado es importante, pues nos muestra cómo combinar los significados de las palabras para obtener los significados de las oraciones. "El plazo para presentar la declaración de renta acaba mañana" y "el plazo para presentar la declaración de renta acaba hoy" no significan lo mismo, aunque emitamos la segunda oración al día siguiente de la primera, de acuerdo con esta última noción de significado, ni llegarán nunca a significar lo mismo, a no ser que un cambio radical en la lengua haga que "mañana" y "hoy" sean sinónimos. Un tema central de la filosofía del lenguaje y la lingüística es el de la articulación de estas dos nociones de significado, que cabría vincular a los nombres de Grice y Frege, respectivamente.

De la teoría sobre la racionalidad y la acción Mosterín pasa a la práctica en *La ortografía fonémica del español*. El título revela tan sólo parcialmente el contenido del libro, que es un alegato apasionado (pero no pasional, sino razonado) sobre la irracionalidad de nuestras ortografías y la necesidad de reformarlas: "Las actuales escrituras de las lenguas principales se desvían con gran frecuencia del principio fonémico. Muchas de estas desviaciones son injustificables, aunque puedan ser explicadas históricamente. Constituyen obstáculos absurdos e innecesarios a su aprendizaje, carecen de ventaja de ningún género y deberían ser eliminadas por cualquier reforma ortográfica" (página 36). El principio fonémico postula que para cada fonema debe haber una letra, y para cada letra un fonema. Una ortografía basada en el principio fonémico ofrecería enormes ventajas en cuanto a la facilidad para aprender a escribir e incluso –en el caso de que no se trate de la lengua materna– a hablar (esto supone una creencia en la realidad psicológica de los fonemas que quizá no se halle totalmente justificada).

Inicialmente puede hacérsenos un tanto extraño que Mosterín comience a llevar a la práctica sus ideas sobre racionalidad en un aspecto socio-cultural como es la escritura, pero la lectura de la primera parte del libro es bastante persuasiva en cuanto a la importancia, conveniencia y oportunidad de la empresa.

Dado el tema, no es sorprendente que Mosterín utilice un tono didáctico (presente tambien en *Racionalidad...*, aunque en menor grado) y, a veces, abiertamente propagandístico, como cuando atribuye las iniciativas de reforma ortográfica a "los espíritus más despiertos" y califica de "sabihondos del Renacimiento", "pedantes" o mantenedores de privilegios a cuantos se han opuesto a esas iniciativas. El lector puede tener la impresión de que se le están escamotenado argumentos en contra. Si nos ponemos por un momento la toga de abogado del diablo podemos pensar que, al menos en algunas lenguas, la reforma ortográfica haría que, de golpe, la lectura de libros del pasado incluso más reciente fuera una empresa para especialistas. Consideraciones como ésta pueden obrar como razones para oponerse a una reforma ortográfica. El modelo teórico de racionalidad de Mosterín no da tanto de sí como para declarar irracional *toda* oposición a la reforma ortográfica. Creo pues que el libro sería aún mejor y más efectivo si Mosterín hubiera hecho un esfuerzo por instalarse en algún momento en el punto de vista de algunos de los posibles opositores a la reforma.

Sin embargo, la ingeniosa e inteligente defensa que Mosterín hace de la necesidad de reforma no puede dejar de impresionar favorablemente al lector, contagiándole de fervor reformista (que es de lo que se trata). El objetivo último es más amplio que el de facilitar el aprendizaje. Se trata de maximizar la comunicación o, mejor dicho, "maximizar la facilidad, economía y eficacia de ese modo de comunicación que es la escritura" (pág. 49). Por ello se hace necesario introducir restricciones al principio fonémico: habrá veces en que la comunicación transdialectal o la conveniencia de la uniformidad de escritura de diversos alomorfos fonémicos del mismo morfema o de distinguir en la escritura palabras o morfemas que en el habla son iguales pero que significan cosas distintas (homófonos) lleve a introducir restricciones al principio fonémico. Mosterín analiza lúcidamente estos diferentes tipos de restricciones: transdialectal, morfémica y semántica. Por otro lado, el principio fonémico es insuficiente, pues no nos dice *qué* letra o símbolo hay que asignar a un fonema. Mosterín argumenta –y ésta es una de las mejores y más audaces propuestas del libro– que el tiempo de las reformas pensadas sólo para una lengua ha pasado ya, y que es preciso ir hacia reformas en que –en la medida de lo posible– los mismos fonemas de lenguas distintas se representen igual, para lo que afortunadamente podemos contar con el alfabeto de la Asociación Fonética Internacional.

Mosterín tiene decididamente el don de la claridad expositiva. No es necesario ningún conocimiento previo de fonología o de lingüística, dado que los conceptos son explicados a medida que se introducen y además hay un glosario con el que el lector puede ayudarse. La lectura del libro se hace fácil y la reconocida agudeza e ingenio del autor la hace atractiva. Es preciso señalar esto porque, dado el tema, uno podría pensar que tenemos ante nosotros un abstruso tratado dirigido solamente a especialistas.

La terminología es particularmente clara y, a veces, felizmente escogida, como cuando se llama "morfonema" a lo que los generativistas llaman "fonema" (algo bien distinto a lo que los estructuralistas de Praga o de cualquier otro sitio llaman "fonema"), o como cuando Mosterín habla de "desviaciones patográficas" del principio fonémico. Estas, las patografías, o maneras de escribir "que entorpecen la comunicación y dificultan el aprendizaje, sin ningún tipo de ventajas compensatorias" (página 49) son clasificadas en varios grupos, presentándose numerosos ejemplos tomados de la escritura de lenguas como el francés, el inglés, el alemán y el español. Mosterín los elige bien y hace que a veces nos resulte realmente cómico el modo de escribir ortográficamente esas diversas lenguas.

El libro *también* se dirige a especialistas. A estos interesará especialmente la propuesta concreta que para la reforma ortográfica del español (¡ojo! reforma ortográfica, no reforma de la lengua: Mosterín es muy cuidadoso a la hora de caracterizar la escritura como un sistema de *transcripción* de la lengua) se hace en la segunda parte. La propuesta está admirablemente razonada y sopesada. (D. Q.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

AGREGADOS CRISTALINOS DE MORFOLOGIA INDUCIDA

CRECIMIENTO DE CRISTALES EN GELES. II. NUEVA VARIANTE. J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós en *Bol. R. Soc. Española Hist. Nat.* n.° 77, págs. 101-119; 1979.

TEORÍA DEL CRECIMIENTO DE CRISTALES EN GELES. PRECIPITACIÓN POLIMÓRFICA Y AGREGADOS CRISTALINOS DE MORFOLOGÍA INDUCIDA. J. M. García-Ruiz. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid; 1981.

CRYSTAL AGGREGATES WITH INDUCED MORPHOLOGIES GROWN BY SILICA GEL TECHNIQUE. J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós en *Bol. Soc. Franc. Cristall. et Miner*; 1981.

MORPHOLOGICAL ASPECTS OF SOME SYMMETRICAL CRYSTAL AGGREGATES GROWN BY SILICA GEL TECHNIQUE. J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós en *Journal of Crystal Growth*, vol. 55, n.° 2, págs. 379-383. North-Holland Publishing Company; noviembre, 1981.

RADIOASTRONOMIA POR INTERFEROMETRIA DE MUY LARGA BASE

INTERCONTINENTAL RADIO ASTRONOMY. K. I. Kellermann en *Scientific American*, vol. 226, n.° 2, págs. 72-83; febrero, 1972.

INTRODUCTION TO VERY-LONG-BASELINE INTERFEROMETRY. Marshall H. Cohen en *Proceedings of the IEEE*, vol. 61, n.° 3, págs. 1192-1197; septiembre, 1973.

QUASARS AND ACTIVE NUCLEI OF GALAXIES: PROCEEDING OF THE COPENHAGEN SYMPOSIUM ON "ACTIVE NUCLEI", JUNE 27-JULY 2, 1977. Dirigido por O. Ulfbeck en *Physica Scripta*, vol. 17, n.° 3, págs. 135-385; marzo, 1978.

CALMODULINA

CALCIUM AND CELL FUNCTION, VOL. 1: CALMODULIN. Dirigido por Wai Yiu Cheung. Academic Press, 1980.

CALMODULIN. C. B. Klee, T. H. Crouch y P. G. Richman en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 49, págs. 489-515; 1980.

CALMODULIN AND CELL FUNCTION. Dirigido por D. Martin Watterson y Frank F. Vincenzi en *Annals of the New York Academic of Sciences*, vol. 356, págs. 1-443; 1980.

CALMODULIN PLAYS A PIVOTAL ROLE IN CELLULAR REGULATION. Wai Yiu Cheung en *Science*, vol. 207, n.° 4426, págs. 19-27; 4 de enero de 1980.

DISCOVERY AND RECOGNITION OF CALMODULIN: A PERSONAL ACCOUNT. Wai Yiu Cheung en *Journal of Cyclic Nucleotide Research*, vol. 7, n.° 2, págs. 71-84; 1981.

LA MECANICA CUANTICA DE LOS MATERIALES

THE PSEUDOPOTENTIAL CONCEPT. Volker Heine en *Solid State Physics*, vol. 24, págs. 1-36; 1970.

THE CHEMICAL BOND AND SOLID STATE PHYSICS. James C. Phillips en *Physics Today*, vol. 23, n.° 2, págs. 23-30; febrero, 1970.

BONDS AND BANDS IN SEMICONDUCTORS. James C. Phillips. Academic Press, 1973.

INTRODUCTION TO SOLID STATE PHYSICS. Charles Kittel. John Wiley & Sons, Inc., 1976.

THE PSEUDOPOTENTIAL PANACEA. Marvin L. Cohen en *Physics Today*, vol. 32, n.° 7, págs. 40-47; julio, 1979.

ARQUEOLOGIA DE LA CUEVA DE LASCAUX

LASCAUX: PAINTINGS AND ENGRAVINGS. Annette Laming. Penguin Books, 1959.

DÉBRIS DE CORDE PALÉOLITHIQUE À LA GROTTE DE LASCAUX (DORDOGNE). A. Glory en *Mémoires de la Société préhistorique française*, vol. 5, págs. 135-169; 1959.

LASCAUX INCONNU: XIIe SUPPLÉMENT À "GALLIA PRÉHISTOIRE". Arl. Leroi-Gourhan, J. Allain, L. Balout, C. Bassier, R. Bouchez, J. Bouchud, C. Couraud, B. and D. Delluc, J. Evin M. Girard, A. Laming-Emperaire, A. Leroi-Gourhan, M. Sarradet, F. Schweingruber, Y. Taborin, D. Vialou y J. Vouvé. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, 1979.

ESTRUCTURA Y FUNCION DE LOS CARDUMENES DE PECES

SCHOOLING IN FISHES: CRITIQUE AND REVIEW. Evelyn Shaw en *Development and Evolution of Behavior: Essays in Memory of T. C. Schneirla*, dirigido por Lester R. Aronson, Ethel Tobach, Daniel S. Lehrman y Jay Rosenblatt. W. H. Freeman and Company, 1970.

THE SENSORY BASIS OF FISH SCHOOLS. B. L. Partridge y T. J. Pitcher en *Journal of Comparative Physiology*, vol. 135, págs. 315-325; 1980.

MECANISMOS CEREBRALES DE LA ATENCION VISUAL

BEHAVIORAL ENHANCEMENT OF VISUAL RESPONSES IN MONKEY CEREBRAL CORTEX, I: MODULATION IN POSTERIOR PARIETAL CORTEX RELATED TO SELECTIVE VISUAL ATTENTION. M. Catherine Bushnell, Michael E. Goldberg y David Lee Robinson en *Journal of Neurophysiology*, vol. 46, número 4, págs. 755-772; octubre, 1981.

LA SOCIEDAD LUNAR DE BIRMINGHAM

THE LIFE OF MARY ANNE SCHIMMELPENNINCK. Dirigido por Christiana C. Hankin. Longman, Green y Robert, London, 1860.

LIVES OF BOULTON AND WATT. Samuel Smiles. J. B. Lippincott and Company, 1865.

THE LUNAR SOCIETY OF BIRMINGHAM. Robert E. Schofield. Oxford University Press, 1963.

TEMAS METAMAGICOS

SELF-REFERRING LAWS. H. L. A. Hart en *Festskrift Tillägnad Karl Olivecrona*. Kungliga Boktryckeriet, P. A. Norsted & Soner, Stockholm, 1964.

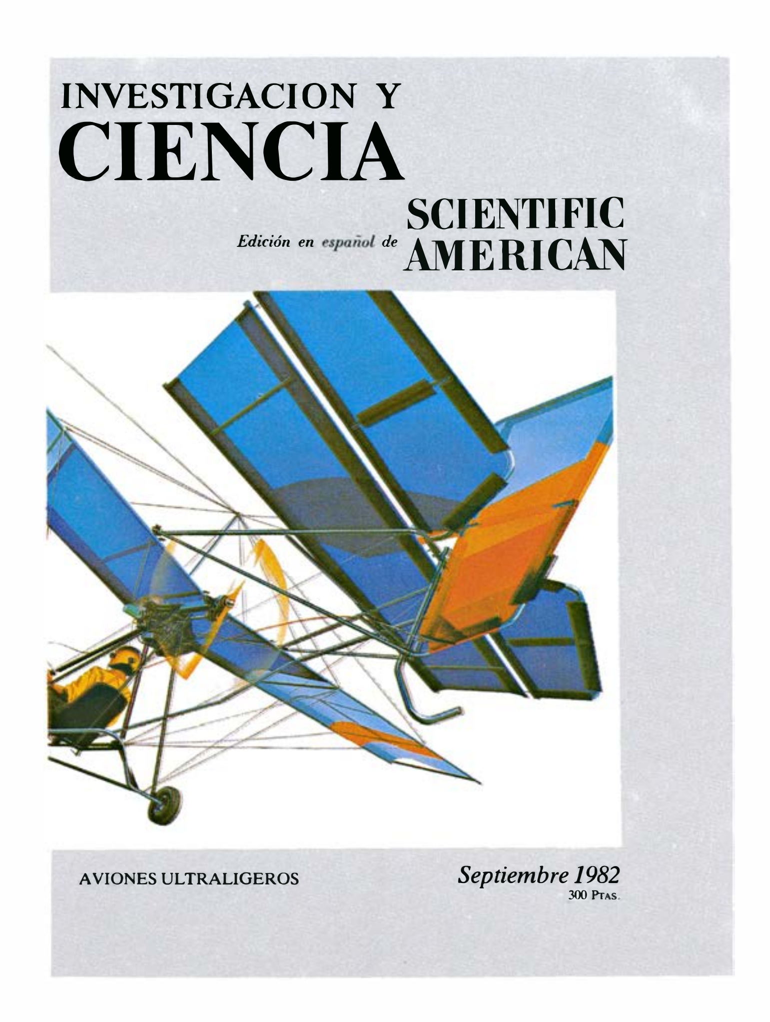
ON SELF-REFERENCE AND A PUZZLE IN CONSTITUTIONAL LAW. Alf Ross en *Mind*, vol. 78, n.° 309, págs. 1-24; enero, 1969.

TALLER Y LABORATORIO

PHYSICS AND BALLET: A NEW PAS DE DEUX. Kenneth Laws en *New Directions in Dance*, dirigido por Diana Theodores Taplin. Pergamon Press, Oxford, 1979.

PRECARIOUS AURORA—AN EXAMPLE OF PHYSICS IN PARTNERING. Kenneth Laws en *Kinesiology for Dance*, n.° 12; agosto, 1980.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL TELESCOPIO ESPACIAL, por John N. Bahcall y Lyman Spitzer, Jr.
En 1985, la lanzadera espacial norteamericana pondrá en órbita el mayor telescopio astronómico diseñado para operar más allá de los efectos pertubadores de la atmósfera terrestre.

SUPERCONDUCTORES ORGANICOS, por Klaus Bechgaard y Denis Jérome
La capacidad de transporte sin resistencia de una corriente eléctrica había sido observada sólo en metales. Actualmente la conductividad se aprecia en ciertos cristales orgánicos constituidos por moléculas planas apiladas en zig-zag.

AVIONES ULTRALIGEROS, por Michael A. Markowski
La unión de un planeador de piloto suspendido y el pequeño motor ha dado lugar al "vehículo aéreo de recreo". Un aparato típico transporta 90 kilogramos y vuela a 80 kilómetros por hora.

EFUSIONES DE ENERGIA EN ESTRELLAS JOVENES, por Charles J. Lada
La radiación emitida por las moléculas de monóxido de carbono en las nubes de gas y polvo donde se están formando nuevas estrellas revela masas de gas moviéndose hacia fuera, a gran velocidad y en sentidos opuestos.

TOPOISOMERASAS DE ADN, por James C. Wang
Se trata de enzimas que transforman anillos de ADN de una conformación topológica en otra. Quizás estén implicadas en la transcripción y replicación génicas.

LA REPRODUCCION COOPERATIVA DE LA ABUBILLA ARBOREA VERDE, por J. David Ligon y Sandra H. Ligon
En estas aves del Africa oriental, se reproduce una sola pareja de cada bandada. Los adultos no reproductores ayudan a la crianza de los polluelos.

ANEURISMAS, por Kaj Johansen
Las perturbaciones locales del flujo sanguíneo, junto con el stress hidráulico repetitivo generado más de 100.000 veces al día por el corazón, subyacen a estas dilataciones de la pared arterial.

LA SECRECION INTESTINAL, por Ana Ilundáin y R. J. Naftalin
Un mismo tipo celular es capaz de absorber y segregar agua y electrolitos. El balance entre los dos procesos depende de la concentración de calcio en la célula.

